



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV STAVEBNÍHO ZKUŠEBNICTVÍ

INSTITUTE OF BUILDING TESTING

**VLIV ZMĚNY VLHKOSTI DŘEVA NA JEHO
FYZIKÁLNÍ A MECHANICKÉ VLASTNOSTI**

THE INFLUENCE OF THE CHANGE OF MOISTURE CONTENT OF TIMBER ON ITS PHYSICAL-
MECHANICAL PROPERTIES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Aneta Dziadková

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. VĚRA HEŘMÁNKOVÁ, Ph.D.

BRNO 2020



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	B3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Bakalářský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3647R013 Konstrukce a dopravní stavby
Pracoviště	Ústav stavebního zkušebnictví

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student	Aneta Dziadková
Název	Vliv změny vlhkosti dřeva na jeho fyzikální a mechanické vlastnosti
Vedoucí práce	Ing. Věra Heřmánková, Ph.D.
Datum zadání	30. 11. 2019
Datum odevzdání	22. 5. 2020

V Brně dne 30. 11. 2019

doc. Ing. Pavel Schmid, Ph.D.

Vedoucí ústavu

prof. Ing. Miroslav Bajer, CSc.

Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

- SVOBODA, L. a kol.: Stavební hmoty 3. vydání (elektronická kniha – plný text: <http://people.fsv.cvut.cz/~svobodal/>)
- Kolektiv autorů: Stavební látky – cvičebnice, CERM Brno, 2013
- KUKLÍK P.: Dřevěné konstrukce, ČKAIT 2005
- ČSN EN 408 Dřevěné konstrukce – Konstrukční dřevo a lepené lamelové dřevo – Stanovení některých fyzikálních a mechanických vlastností
- Další příslušné platné normy

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Úvod – stručný úvod do problematiky bakalářské práce.

Cíl práce – provést zjištění fyzikálních a mechanických vlastností dřeva při různé vlhkosti a ověřit závislosti jednotlivých vlastností na vlhkosti dřeva.

Teoretická část – rešerše doporučené literatury a vypracování podkladů pro řešení bakalářské práce se zaměřením na fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva a jejich závislosti na vlhkosti dřeva.

Experimentální část – na vzorcích dřeva stanovit:

- hustotu dřeva,
- rozměrové a objemové bobtnání dřeva,
- pevnost dřeva v tlaku rovnoběžně s vlákny,

a ověřit závislost těchto veličin na různé vlhkosti vzorků dřeva stanovené váhovou metodou.

Ověřit statickým výpočtem rozdíl únosnosti konstrukčního prvku namáhaného v tlaku při různých vlhkostech.

Závěr – provést krátké shrnutí a jasně a přehledně deklarovat výsledky bakalářské práce.

STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část závěrečné práce zpracovaná podle platné Směrnice VUT "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací" a platné Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací na FAST VUT" (povinná součást závěrečné práce).
2. Přílohy textové části závěrečné práce zpracované podle platné Směrnice VUT "Úprava, odevzdávání, a zveřejňování závěrečných prací" a platné Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací na FAST VUT" (nepovinná součást závěrečné práce v případě, že přílohy nejsou součástí textové části závěrečné práce, ale textovou část doplňují).

Ing. Věra Heřmánková, Ph.D.
Vedoucí bakalářské práce

VLIV ZMĚNY VLNKOSTI DŘEVA NA FYZIKÁLNÍ A MECHANICKÉ VLASTNOSTI

Abstrakt

Bakalářská práce zjišťuje mechanické a fyzikální vlastnosti dřeva při různých stavech nasycení vodou. Na sedmi sadách vzorků se stanoví hustota, rozměrové a objemové bobtnání, pevnost v tlaku a pevnost v tahu za ohybu. Tyto zkoušky budou následně vyhodnoceny a vloženy do grafu v závislosti na různých vlhkostech.

Klíčová slova

Dřevo, mechanické vlastnosti dřeva, fyzikální vlastnosti dřeva, vlhkost dřeva, bobtnání dřeva, hustota dřeva, pevnost v tlaku, pevnost v tahu za ohybu

Abstract

This bachelor thesis determines mechanical and physical properties of timber in different state of water absorption. Three sets of samples will be used to define their density, dimensional and volume swelling ratio, compressive strength and bending tensile strength. As an evaluation, properties obtained from testing will be graphically illustrated depending on moisture content.

Keywords

Timber, mechanical properties of timber, physical properties of timber, moisture of timber, swelling of timber, density of timber, compressive strenght, flexural strenght

Bibliografická citace

Aneta Dziadková Vliv změny vlhkosti dřeva na jeho fyzikální a mechanické vlastnosti. Brno, 2020. 57 s., 14 s. příl. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav stavebního zkušebnictví. Vedoucí práce Ing. Věra Heřmánková, Ph.D.

Prohlášení o shodě listinné a elektronické formy závěrečné práce

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané bakalářské práce s názvem *Vliv změny vlhkosti dřeva na jeho fyzikální a mechanické vlastnosti* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 22. 5. 2020

Aneta Dziadková

autor práce

Prohlášení o původnosti závěrečné práce

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem *Vliv změny vlhkosti dřeva na jeho fyzikální a mechanické vlastnosti* zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 22. 5. 2020

Aneta Dziadková

autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji především své vedoucí práce Ing. Věře Heřmánkové, Ph.D. za odborné vedení, za všechny užitečné rady a připomínky, trpělivost, vstřícnost, ochotu a čas věnovaný po celou dobu zpracování mé bakalářské práce. Dále bych chtěla poděkovat všem, kteří mě podporovali, věřili ve mně, dodávali mi sílu, energii a motivaci jak při tvorbě této bakalářské práce, tak během samotného studia na vysoké škole, a to hlavně mým rodičům, sestře a všem přátelům.

Obsah

1 ÚVOD	11
2 CÍL PRÁCE	12
3 DŘEVO A JEHO STRUKTURA, DRUHY A VADY	13
3.1 Charakteristika dřeva	13
3.1.1 Definice dřeva	13
3.1.2 Základní řezy dřevem	13
3.1.3 Stavba stromu a jeho kmene	14
3.2 Struktura dřeva	15
3.2.1 Chemické složení	15
3.2.2 Skladba dřeva	16
3.3 Druhy dřeva	18
3.3.1 Jehličnaté dřevo	18
3.3.2 Listnaté dřevo	19
3.4 Vady a poškození dřeva	19
3.4.1 Biotické faktory	20
3.4.2 Abiotické faktory	23
3.4.3 Růstové vady	23
3.5 Ochrana dřeva	24
4 VLASTNOSTI DŘEVA	25
4.1 Fyzikální vlastnosti dřeva	25
4.1.1 Hustota dřevní hmoty	25
4.1.2 Objemová hmotnost dřeva	25
4.1.3 Vlhkost dřeva	26
4.1.4 Hustota dřeva	29
4.1.5 Tepelné vlastnosti	29

4.1.6 Hořlavost	29
4.1.7 Elektrické vlastnosti dřeva	29
4.1.8 Akustické vlastnosti dřeva.....	30
4.2 Mechanické vlastnosti dřeva	30
4.1.1 Pružnost dřeva	31
4.1.2 Pevnost	31
4.1.3 Rázová houževnatost dřeva	32
4.1.4 Tvrdost.....	32
4.1.5 Štípatelnost dřeva	33
4.1.6 Ohýbatelnost.....	33
5 PRAKTICKÁ ČÁST	34
5.1. Výběr vzorků.....	34
6.2. Sušení a měření vysušených vzorků	34
6.3 Vlhčení a měření vzorků	35
6.4 Stanovení vlhkosti váhovou metodou	36
6.5 Hustota dřeva	37
6.5.1 Stanovení hustoty dřeva	37
6.5.2 Hustota dřeva v závislosti na vlhkosti	37
6.6 Bobtnání dřeva	39
6.6.1 Výpočet bobtnání.....	39
6.6.2 Závislost bobtnání na vlhkosti.....	39
6.6 Pevnost v tlaku	41
6.6.1 Zkoušení vzorků v tlaku rovnoběžně s vlákny	41
6.6.2 Vliv vlhkosti na pevnost v tlaku	42
6.7 Pevnost v tahu	44
6.7.1 Zkoušení vzorků v tahu za ohybu.....	44

6.7.2 Vliv vlhkosti na pevnost v tahu za ohybu	45
6.8 Ověření závislosti pevnosti v tlaku vlivem vlhkosti	47
6.8.1 Statický výpočet	47
6.8.1 Zahrnutí vlivu bobtnání do posouzení prvku.....	50
6. ZÁVĚR	52
7. SEZNAMY	53
7.1 Seznam použité literatury a zdrojů.....	53
7.2 Seznam obrázků	55
7.3 Seznam tabulek	56
7.4 Seznam grafů.....	56
7.5 Seznam příloh.....	57

1 ÚVOD

Dřevo patří mezi nejstarší přírodní obnovitelné stavební materiály. Už v pravěku bylo používáno pro primitivní obydlí, pracovní nástroje nebo jako zdroj energie. S časem se stavby zdokonalovaly přes srubové, roubené stavby až do současné podoby moderní architektury. Dálo by se říct, že v dnešní době patří dřevo mezi nenapodobitelný a velice ekonomický výhodný materiál. Životnost závisí na prostředí, kde strom vyrostl a kde a jak bylo dřevo následně skladováno. Stavba může sloužit až několika generacím, důkazem jsou staré roubené stavby, které jsou mnohdy starší než 150 let. Za dobu životnosti dřevěného domu vyrostle nový les. Jedná se tedy o velice efektivní způsob stavění, včetně recyklace materiálu pro stavbu.

Mezi velké klady dřeva patří velmi dobré tepelně izolační vlastnosti. Příkladem, že dřevo dobře akumuluje teplo, jsou stavby v Norsku a severních zemích, kde je tento materiál často využíván. Dřevostavby zajišťují čistší vzduch, který je vhodný pro osoby trpící alergiemi. Dalšími kladnými vlastnostmi jsou: lehkost, snadná opracovatelnost a schopnost přirozené obnovy. Velice často se dřevo používá i s estetických důvodů.

Mezi nedostatky patří vady, objemové změny způsobené vlhkostí a nízká biologická odolnost. Se změnou vlhkosti dochází ke změnám různých vlastností dřeva, například hustoty, pevnosti nebo pružnosti. Anizotropie způsobuje rozdílné vlastnosti v různých směrech. Důraz se klade na ochranu proti napadení dřevokaznými škůdci a na protipožární ochranu.

2 CÍL PRÁCE

Cílem této bakalářské práce je určit chování dřeva, jeho mechanické a fyzikální vlastnosti v různých stavech vlhkosti. Zkoušeno bude sedm sad vzorků různě nasycených vodou. Vzorky byly vybrány ze smrkového dřeva, pečlivě zkontrolovány tak, aby neobsahovaly viditelné vady jako např. suky. V této bakalářské práci budou zjišťovány následující vlastnosti: pevnost v tlaku rovnoměrně s vlákny, pevnost v ohybu, rozměrové a objemové bobtnání a hustota dřeva. Vyhodnocení všech zkoušek a závislosti na různém stupni vlhkosti bude provedeno graficky.

3 DŘEVO A JEHO STRUKTURA, DRUHY A VADY

3.1 Charakteristika dřeva

3.1.1 Definice dřeva

Dřevo je přírodní organický, nehomogenní, anizotropní a hydrofobický materiál. Z biologického pohledu je to soubor rostlinných pletiv. Skládá se hlavně z přírodních biopolymerů, a to z celulózy, hemicelulózy a nacházejícího se v buněčných stěnách ligninu. **Dříví** můžeme definovat jako stojící nebo pokácené stromy nebo jako formu prvního zpracování. Dlouhé oblé dříví můžeme nazvat kulatinou. Jako **dřevinu** označujeme rostliny, které hlavně v nadzemních a podzemních osách (kořen, kmeny, větve) tloustnou a dřevnatí (lignifikují). Můžeme je rozdělit na stromy, keře, polokeře a dřevnaté liány [1], [2], [3].

Strom dosahuje vyššího až vysokého vzrůstu. Tvoří ho kořen, kmen a koruna. Kmen je hlavní nerozvětvenou osou ve spodní části, později se rozvětňuje a přechází do koruny stromu. Dřevo se nachází mezi dřéní a lýkem (kambiem). Ve stavebním průmyslu se využívá hlavně dřevo kmene stromu [2], [3].

Keř se rozvětňuje již od země a dosahuje tak nižší výšky. Ve stavebnictví nemá uplatnění [2], [3].

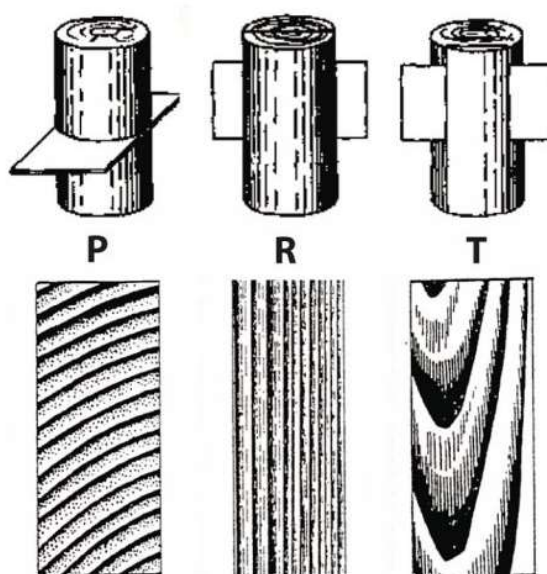
3.1.2 Základní řezy dřevem

Vlastnosti dřeva se liší v různých směrech, abychom určili strukturu dřeva, rozlišujeme tři základní řezy a směry. Patří mezi ně: příčný (P), radiální (R), tangenciální (T) [4].

Příčný řez je řez, který prochází rovinou kolmou k ose kmene. Charakterizuje ho soustředěné uspořádání letokruhů [4].

Radiální řez prochází středem (dřéní) rovnoběžně s osou kmene. Letokruhy tvoří svislé pásy [4].

Tangenciální řez je také veden svisle, rovnoběžně s osou kmene, ale na rozdíl od radiálního řezu, neprochází středem. Letokruhy připomínají svým tvarem paraboly (fládry) [4].



Obrázek 1: Základní řezy dřevem (příčný (P), radiální (R), tangenciální (T)) [26]

3.1.3 Stavba stromu a jeho kmene

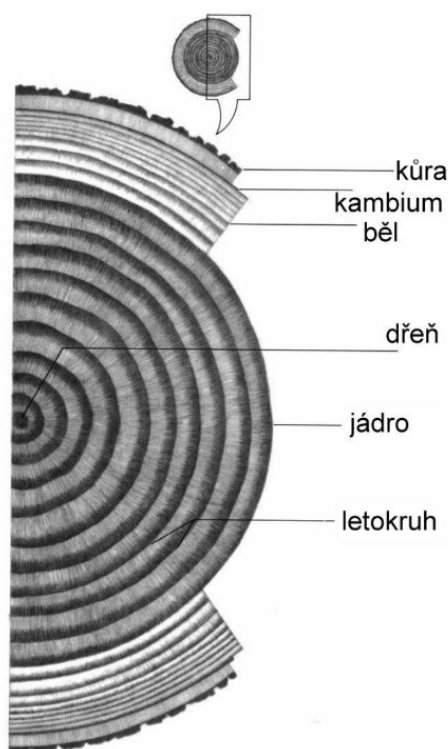
Dřeviny obsahují tři základní vegetativní orgány, a to korunu, kmen a kořeny. Kmen se skládá s kůry (borka + lýko), kambia, dřeva a dřeni [3].

Kůra se nachází na povrchu jako vnější a vnitřní vrstva kmene s ochrannou funkcí. Vnější část (periderm) je tvořený z korku, dělivého pletiva a zelené kůry. Vnitřní, spodní vrstva (floém) se nazývá lýko. **Borka** je soubor odumřelých pletiv kůry dřeva. Podle povrchu rozlišujeme kůry hladké, brázdité, šupinovité a bradavičnaté. Tloušťka závisí na druhu a stáří stromu, většinou se množství pohybuje mezi 6-25 % objemu stromu [2], [3], [4].

Kambium je velice tenká vrstva, která se nachází mezi kůrou a dřevem. Jedná se o buněčné pletivo. Její funkcí je spojena s růstem kmene. Dovnitř vytváří buňky dřeva a na druhou stranu buňky lýka [2], [4], [3].

Dřevo tvoří nejvíc objemu stromu, a to 70 až 93 % a je hlavní částí kmene. Za jedno vegetační období vznikne letokruh a ten tvoří bělová část a jádrová část. Běl je vnější částí a obsahuje živé buňky. Jeho funkcí je ukládat živiny a rozvádět vodu ve stromu. Jádro je starší, tmavší, trvanlivější a hustší vnější část. Obsahuje odumřelé buňky [2], [3], [4].

Dřeň je velice měkké, řídké pletivo, většinou oválného tvaru s nízkými mechanickými vlastnostmi, které se nachází ve středu kmene. Na začátku života stromu pomáhá s transportem vody. Vysycháním vznikají dřeňové trhliny, směrem od dřeně [2], [3], [4].



Obrázek 2: Řez kmenem a jeho stavba [3]

3.2 Struktura dřeva

3.2.1 Chemické složení

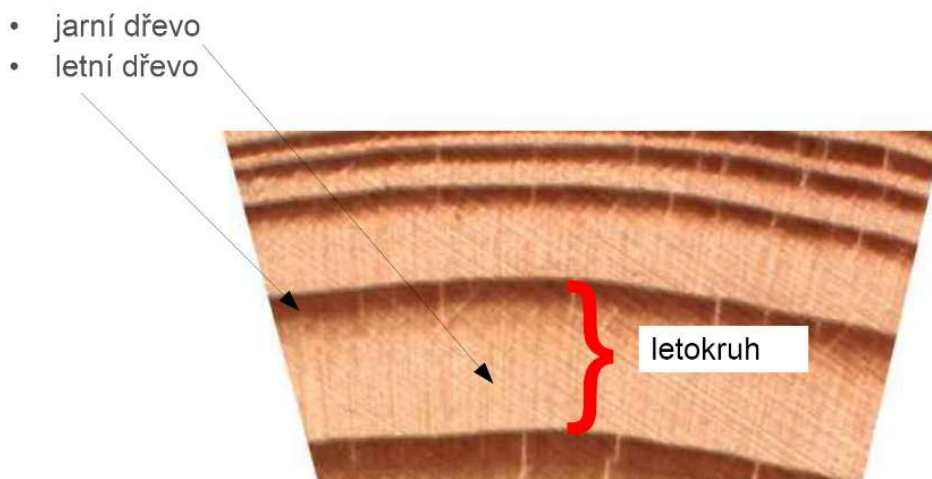
Chemické složení se u všech druhů dřeva prakticky neliší. S nepatrnými odchylkami se pohybuje okolo hodnot: uhlík 50 %, kyslík 43 %, vodík 6 %, dusík 0,3 % zbytek tzn. kolem 0,7 % tvoří minerální látky, obsahující draslík, sodík, vápník, fosfor, hořčík aj. Tyto prvky tvoří několik organických látek. Mezi nejdůležitější patří celulóza (cca 50 %), hemicelulóza (cca 22 %), lignin (cca 22 %) a další látky jako pryskyřice, tuky, vosky, barviva, alkaloidy a minerální látky, které tvoří vnitřek buněk [1], [2].

3.2.2 Skladba dřeva

Skladba neboli struktura je uspořádání a složení dřeva v příčném směru. Vlastnosti dřeva vycházejí z makroskopické, mikroskopické a submikroskopické stavby [4].

Makroskopická stavba lze ji popsat pouhým pohledem na řez a to tzv. *texturou*. Slouží nám k určení druhu dřeva, vad a jakosti. Má značný vliv na mechanické a fyzikální vlastnosti a na zpracování dřeva. Základní znaky makroskopické struktury jsou:

- **Letokruhy** jsou přírůstky na tloušťku (v radiálním směru) během jednoho vegetačního období. Tvoří tvary prstenců, které se skládají z jarního a letního dřeva. **Jarní dřevo** se tvoří hlavně v první polovině vegetačního období, a proto tvoří vnitřní část. Je světlé barvy a je měkkší. **Letní dřevo** vzniká v druhé části, a to až do konce vegetativního období. Má tmavší barvu a je tvrdší než dřevo jarní. Tloušťka letokruhu nám pomáhá určit druh dřeva a má vliv na fyzikální a mechanické vlastnosti. Vliv na šířku letokruhu může mít: světlo, mráz, kyselý déšť, poškození hmyzem, období sucha atp. Během jednoho roku může vzniknout více letokruhů, nebo se nemusí vytvořit vůbec žádný letokruh. Proto počet nemusí představovat stáří stromu [1], [3], [4].



Obrázek 3: Letokruh [3]

- **Dřeňové paprsky** jsou skupiny buněk (pásky), které jsou uloženy kolmo na osu kmene. Jejich rozměry a rozložení v řezu slouží k ohodnocení kvality dřeva [1], [3].

- **Dřeňové skvrny** aneb pásy (skvrny) je tzv. hojivý parenchym, který vznikl vlivem poškození kambia. Většinou ho nalezneme u listnatých dřevin [1], [3].
- **Cévy** v příčném řezu připomínající póry, jsou kanálky, které jsou rovnoběžné s podélnou osou kmene. Vyskytují se pouze u listnatých dřevin [1], [3].
- **Pryskyřičné kanálky** se vyskytují v příčném řezu u jehličnatých dřevin jako malé tmavší tečky, které se moc barevně neliší od okolního dřeva, ale vylučují pryskyřici. Vyplňují mezibuněčné prostory. Podle směru rozlišujeme vertikální a horizontální kanálky [1], [3].
- **Suky** můžeme charakterizovat jako stopy po odumřelých nebo živých větvích, které rostou většinou v úhlu menším než 90° na osu kmene. Jsou pomocným znakem pro určení jehličnatého dřeva [1], [3].
- **Barva** tu lze rozlišit na jádro a běl. **Jádro** se nachází ve středu a obsahuje jen mrtvé buňky. Je tmavší barvy a téměř nepropouští kapaliny. Na rozdíl od běle má vyšší odolnost a trvanlivost. Nemusí se vyskytovat u všech dřevin. **Běl** je světlejší barvy a nachází se po vnějším obvodu. Tloušťka může být různá, od několika letokruhů až po veškerou plochu řezu. Rozvádí vodu a živiny. **Vyzrálé dřevo** strukturou se podobá jádru, ale barvou bělí. Nepatrně se liší odstínem a to proto, že běl obsahuje větší vlhkost [1], [4], [5].
- **Lesk** je schopnost odrážet světelné paprsky. Vyskytují se dřeva matné a lesklé [3].
- **Vůně** závisí na množství éterických olejů, pryskyřic, tříslovin a dalších látek obsažených ve dřevě [3].

Mikroskopická stavba není viditelná pouhým okem. Zabývá se rozměry, uspořádáním a složením buněk. U *jehličnatých dřevin* 95 % složení objemu tvoří tzv. *tracheidy*. Buňky jsou dlouhé 2 až 5 mm a mají tloušťku stěny 2 až 3 μm nebo 5 až 7 μm, podle toho, zda se jedná o buňky letní nebo jarní. U *listnatých dřevin* se vyskytují tzv. *hydrocyty*, které z 75 % vyplňují objem dřevní hmoty. Tyto buňky jsou mnohem objemnější a širší než jiné druhy buněk ve stejném druhu dřeva. Tvoří je vlákna, která jsou většinou rovnoběžná s osou dřeviny. V případě vybočení diagonálně nebo točivě dochází k snížení pevnosti, nepravidelnému sesychání, bortivosti či obtížné obrobitelnosti dřeva. *Dřeňové paprsky* jsou součástí objemu dřevní hmoty. Buňky jsou

uspořádané hlavně v horizontálním směru, u jehličnatých tvoří cca 7 % objemu a u listnatých je to pak kolem 18 % celkového objemu [1].

Submikroskopická stavba se zabývá rozdíly v jednotlivých stavebních jednotkách konkrétní buňky [4].

3.3 Druhy dřeva

Dřevo můžeme dělit podle mnoha kritérií jak například podle tvrdosti, podle země původu nebo třeba podle stáří. Nejčastěji však dřeviny rozdělujeme do dvou skupin na jehličnaté a listnaté. Mechanické a fyzikální vlastnosti se pak mohou lišit jak mezi jednotlivými druhy, tak i v rámci jednoho druhu dřeva. Např. množství srážek, škůdci, druh podloží, nadmořská výška to všechno jsou faktory, které mají vliv na vlastnosti každého dřeva [1], [5].

Podle barvy můžeme dřeviny rozlišit na bělové a jádrové. Bělové mají světlejší barvu, jádro je barevně odlišeno. Jsou to převážně vyzrálější dřeva. Dřeviny jádrové lépe vzdorují změně vlhkosti a jsou odolnější vůči hnilobě. Barva jádra bývá tmavší až hnědá. Obsahuje totiž více pryskyřičných látek, barviv apod. [1].

3.3.1 Jehličnaté dřevo

Jehličnaté dřevo patří spíše k měkkým dřevinám. Roste 80 až 100 let do výšky 25 až 40 m. Průměr kmene dosahuje až 2 m. Mezi nejvíce používané ve stavebnictví patří smrk, jedle a borovice [1], [4].

Dřevo smrkové se ve stavebnictví používá nejčastěji. Je měkké a lehce zpracovatelné, lehké, pružné, vhodné pro lepení, mírně smolnaté. Má bílou až nahnědlou barvu a výrazné letokruhy. Používá se jako konstrukční dřevo. V suchu je trvanlivé, ale pod vlivem vlhkosti rychle hnije [1], [4].

Dřevo jedlové má lehce žlutou až červenou barvu. Svou jakostí je lepší dřevo než smrkové, ale je náročnější na zpracování. Je šedobílé, měkké, pružné, ohebné, nosné a velmi dobře štípatelné. Docela hodně sesychá, a tak dochází k vypadávání suků. Obsahuje méně pryskyřice a je méně trvanlivé než dřevo smrkové nebo borové [1], [4].

Dřevo borové obsahuje poměrně hodně suků, které později vypadávají. Společně s modřínem patří mezi jádrová dřeva. Jádro je oranžově hnědé. Má načervenalou barvu, je křehké a pružné. Díky dostatečnému množství pryskyřice dobře odolává vlhkosti.

Používá se v prostředí, kde dochází ke změnám vlhkosti, zejména u stavebního stolařství na venkovní dveře, okenní rámy atp. [1], [4].

Dřevo modřínové je polotvrdé, trvanlivé a velmi pružné. Jeho barva je světlá žlutá, ale stářím červená, hnědá a tmavě. Patří mezi dřeva jádřová, kde jádro je zbarveno do červenohnědé až okrové barvy. Na vzduchu tmavne. Dobře odolává změnám sucha a vlhka. Je rovnoměrně prosyceno dostatečným množstvím pryskyřice. Ve stavebnictví má uplatnění ve stavebně-stolařských pracích a také pro dekorativní obklady stěn a stropů. Je docela vzácné, a proto i cenově nákladnější [1], [4].

3.3.2 Listnaté dřevo

Listnaté dřevo můžeme rozdělit do podskupin na dřevo měkké bělové a tvrdé jádřové. Mezi měkké bělové dřevo patří lípa, osika, olše a kaštan, na tvrdé bělové, kde patří buk, habr, javor, bříza. Mezi tvrdé jádřové dřevo se řadí dub, jasan, a velká skupina ovocných dřevin. Rostou 120 až 160 let do výšky 20 až 25 m (dub až 60 m) a do průměru až 1,5 m. Ve stavebnictví se nejvíce používá bukové nebo dubové dřevo [1], [4].

Dřevo dubové je tvrdé, pevné, houževnaté, těžké, trvanlivé a velice žádané. Charakterizuje ho úzká světlá bělá a široké hnědé jádro. Má velkou tvrdost a pevnost v tahu i tlaku a je proto velice využíván pro výrobu kolíků, klínů a hmoždíků. Značně vzdoruje silným povětrnostním podmínkám. Ve vodě má téměř neomezenou životnost a také je odolné proti ohni, zejména když je vhodně impregnované. Používá se pro náročné konstrukce v mostním a vodním stavitelství [1], [4].

Dřevo bukové je o něco měkčí než dubové, není tak houževnaté. Vyznačuje se malou pružností, přesto je velice tvrdé a poměrně pevné. Má barvu světle hnědou až do růžova. Je těžko opracovatelné a hůře odolává vlivům vlhkosti, jeli špatně impregnováno. Ve stavebnictví se využívá pro výrobu dýh a překližek [1], [4].

3.4 Vady a poškození dřeva

Obecně můžeme říct, že čím je dřevo tmavší tím je trvanlivější. Tmavší dřeva totiž obsahují větší množství pryskyřic a tříslovin, a proto jsou odolnější proti hnilobě. Dřevo jako organický materiál je docela náchylné na biologické a abiotické faktory. Trvanlivost záleží na způsobu skladování, uchovávání, vlhkosti prostředí, způsobu použití apod. [4].

3.4.1 Biotické faktory

Dřevo je většinou napadeno biotickými činiteli, kvůli zvýšené vlhkosti. Nejčastější škůdci dřeva (dřevokazné houby a dřevokazný hmyz) potřebují pro přežití vodu. K napadení dřeva potřebují dostatečnou vlhkost, kyslík, teplo a výživný substrát [4].

Dřevokazné houby způsobují nejčastější a nejnebezpečnější vadu, a to hnilobu dřeva. To se projevuje jako křehkost, protože dřevo ztrácí svou pevnost a následně dochází k jeho rozpadu. Houby mohou napadat buď lignin (bílá hniloba) nebo celulózu (hnědá hniloba) a to už během jeho života. Bohužel na oko se hniloba projeví až ve chvíli, kdy už není možné dřevo zachránit. Nejefektivnější preventivní ochranou je vysušování dřeva a udržování vlhkosti pod hranicí 20 %. Jedině takto nebude dřevo napadeno hnilobou. Mezi nejčastější dřevokazné houby patří [4], [6]:

- **Dřevomorka domácí** (*Serpula lacrymans*), nejznámější houba v ČR, roste a většinou se i rozmnožuje vně různých budov. Pro růst je potřebná vlhkost 25 až 30 % a teplota okolo 20 °C. Má schopnost se rozrůstat i přes jiné typy materiálu jako například beton či zdivo. Většinou se projeví ve stádiu, kdy je už pozdě napadené dřevo zachránit. To je poté potřeba zlikvidovat, případně celkově vyměnit poškozenou část [7], [8].



Obrázek 4: Dřevomorka domácí [8]

- ***Koniofora sklepní*** (*Coniophora puteana*) vyskytuje se ve velice vysoké vlhkosti od 50 %. Proto se nejčastěji vyskytuje ve sklepích. Tato houba napadá celulózu dřeva (způsobuje hnědou hnilobu), co způsobuje nižší pevnost a hmotnost. Ve finální fázi dokáže dřevo rozmělnit na prach [7], [9].
- ***Trámovka plotní*** (*Gloeophyllum sepiarium*) roste většinou bokem ke dřevu, nejčastěji k jehličnatému. K životu jí stačí malé množství vlhkosti a snáší i vyšší teploty. Charakterizuje ji lupénkovité třepení. Vyskytuje se často na plotech, stožárech apod. [7], [10].



Obrázek 5: *Trámovka plotní* [10]

- ***Pornatka Vaillantova*** (*Poria vauillantii*) napadá především jehličnaté dřevo a způsobuje hnědou hnilobu. Pro svůj život potřebuje vlhkost 25 až 40 % a vyšší teplotu (27 až 36 °C). Tvoří tenké bílé, nelámavé, tvrdé provazce podhoubí, které můžou prorůstat různými materiály [7], [11].

Dřevokazný hmyz napadá jak živé stromy, tak jeho zpracovanou formu. Dřevokazný hmyz považuje dřevo jako potravu. Vyžíráním tvoří tmavé chodbičky a napadá hlavně bělové dřevo, protože je lépe zásobeno a obsahuje méně konzervačních látek. Aby bylo dřevo napadeno postačí vlhkost 10-12 %. Bohužel toto dřevo není vhodné pro výrobu kvalitnějších výrobků. Mezi nejznámější druhy patří [4], [7]:

- ***Kůrovci*** (Scolytidae) se vyskytují hlavně u živého dřeva. Kmeny jim slouží k vyvíjení larev (2 měsíce). Jejich tělo je tmavohnědé nebo černohnědé, dlouhé 1-8 mm a má válcovitý nebo oválný tvar. Na hlavě mají pár silný kusadel, kterými tvoří cestičky pod kůrou stromu [7].

- **Pilořitky** (Siricoidea) dospělí jedinci mají válcovitý tvar těla a na konci těla mají dlouhé kladélko. Samička se liší zbarvením hlavy a hrudi (černé zbarvení) a zadečkem (žlutavý) a měří 25 až 45 mm. Sameček je celý černý a mnohem menší a hubenější, měří 10 až 30 mm. Larvy (bělavé barvy) se vyvíjejí z vajíček (2 až 3 roky). Vajíčka jsou samičkou kladena pod kůru a později postupují dovnitř kmene [7], [12].
- **Hrbohlavci** (Lyctidae) mají podlouhlý (3 až 5 mm), hnědý tvar těla. Škodí hlavně ve tvrdém dřevu a to tak, že tvoří tenké chodbičky např. v parketech. Napadají jak dřevo poražené, tak zabudované [7], [13].
- **Červotoči** (Anobiidae) jsou brouci s protáhlým válcovitým až oválným a svrchu zploštělým tělem nejčastěji hnědé nebo načervenalé barvy. Dorůstají do menších až středních rozměrů. Vlastní 8-11 tykadel. Nejčastěji se jedná o červotoče kostkované nebo umrlčí. **Červotoč kostkovaný** napadá mrtvé dřevo (podlahy, stropy, konstrukce budov), je tmavohnědý s hustým žlutošedým ochlupením a je poměrně velký. Larvy se nacházejí hlavně ve dřevěch dubů a buků a vytvářejí chodby podélně s vlákny. **Červotoč umrlčí** je také tmavohnědé barvy, ale na štítu má zlatožluté skvrny, dorůstá do velikosti 0,5 cm. Napadá pouze dřevo ve stavebních objektech, čerstvé dříví nenapadá. Výletové dírky/otvory ve dřevu znamenají, že larvy toto dřevo opustily. Charakteristické pro ně jsou rytmické zvuky (umrlčí hodiny), které slouží k dorozumívání úderem hlavy [7], [14], [15].



Obrázek 6: Červotoč umrlčí [15]

- **Tesaříci** (Cerambycidae) do této skupiny patří **tesařík krovový**, nejvýznamnější technický škůdce, který se vyskytuje jenom u zabudovaných dřevěných konstrukcí především z měkkého dřeva. Je to brouk hnědé barvy, 7 až 25 mm veliký a nevlastní dlouhá tykadla. Larvy mají světlou barvu, silná kusadla a líhnou se z vajíček, které samice kladou do trhlin dřeva. Jejich délka života je 3 a více let, v závislosti na vlhkosti dřeva [7], [16].



Obrázek 7: Tesařík krovový [16]

3.4.2 Abiotické faktory

Tyto faktory mají vliv na mechanické a fyzikální vlastnosti dřeva. Na abiotickou degradaci působí atmosférické vlivy (srážková vody, teplo, vítr apod.). Nejčastějším problémem je vlhkost. Voda se do konstrukce může dostat v kapalně nebo plynné podobě (vodní pára). Následně chemicky reaguje se složkami dřeva, mění se struktura a sníží se pevnost prvku [17], [4].

3.4.3 Růstové vady

Jedná se o nedostatky a anomálie spojené s tvarem, texturou a strukturou dřeva. Mezi růstové vady patří vady tvaru kmene (křivost, boulovitost), nepravidelná struktura (smolník, zárost, svalovitost), suky a trhliny. Právě suky a trhliny se řadí mezi nejnebezpečnější a nejčastější [17], [18].

Suky se tvoří v místě rozvětvení hlavního kmene na vedlejší větev, která si vytváří vlastní letokruhy. To způsobuje odklon vláken, který má vliv na pevnost prvku. Vliv na snížení pevnosti suku má jejich velikost, umístění a typ prvku. Největší roli hraje umístění, neboť i malý suk v nevhodném místě může způsobit snížení pevnosti [18].

Trhliny vznikají změnou napětí ve dřevě. Trhliny tvořící se podél prvku můžeme nazvat výsušné a trhliny na hranici s letokruhem odlupčivé. V případě větších zatížení může dojít i k rozdělení prvku na dvě části [18].

3.5 Ochrana dřeva

Pojem ochrana lze charakterizovat jako veškeré opatření provedené za účelem preventivní ochrany dřeva proti poškození abiotickými nebo biotickými faktory. Ochranu dřeva můžeme rozdělit dle následujících způsobů [19].

Nejznámější ochranou je **impregnace** dřeva. Impregnovat můžeme dehtovými oleji (impregnace černá) nebo vodou ředitelnými látkami (bílá impregnace). Impregnaci můžeme také rozdělit podle způsobu provádění, a to na tlakovou (průmyslově v kotlích) a na beztlakovou (nátěr, postřik, injektáž). Existují taky jiné způsoby ochrany dřeva. Patří mezi ně **plynování**, **ozařování gama zářením** nebo **ohřev** na teplotu až 70 °C po dobu 5 hodin s maximálně 50 % vlhkostí [1].

Ochranné látky můžeme rozdělit podle různých kritérií. Existují přípravky **likvidační** nebo **preventivní**. Toto dělení je závislé na způsobu ničení škůdců. Dále je můžeme rozdělit podle cílové skupiny na **fungicidní** (proti dřevokazným houbám) a **insekticidní** (proti dřevokaznému hmyzu) [1].

Dalším způsobem ochrany dřeva je **konstrukční ochrana dřeva**. Jedná se o ochranu dřeva proti srážkové a vzlínající vodě nebo ochranu proti vodní páře uvnitř dřevěných konstrukcí. Mezi konstrukční zásady pro ochranu dřevěných prvků patří například: omezení velikosti vodorovných ploch, umístování prvku do výškové úrovně nad 300 mm nad terénem, zaoblení hran prvku pro lepší přilnavost nátěru apod. [19].

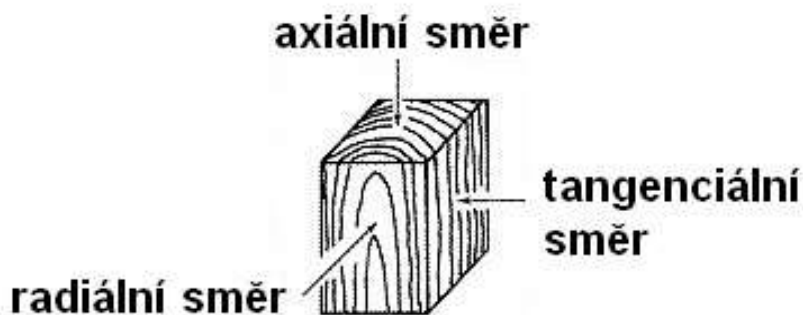
4 VLASTNOSTI DŘEVA

Dřevo patří mezi **anizotropní materiály**. Fyzikální a mechanické vlastnosti se liší v různých směrech dřeva. Rozlišují se tři základní anatomické směry ve dřevě: axiální (AS), radiální (RS) a tangenciální (TS). Nejméně se dřevo deformuje pod vlivem teploty, vlhkosti (vysychání a bobtnání) v podélném (axiálním) směru. V tomto směru má taky největší pevnost a tuhost [4], [20].

Axiální směr je rovnoběžný se svislou osou kmene a kolmý a rovinu příčného řezu.

Radiální směr vede ve směru dřevových paprsků kolmo na plochu tangenciálního řezu.

Tangenciální směr má směr tečny k letokruhům a je kolmý na rovinu radiálního řezu.



Obrázek 8: Základní anatomické směry v dřevině [5]

4.1 Fyzikální vlastnosti dřeva

4.1.1 Hustota dřevní hmoty

Hustota dřevní hmoty neboli měrná hmotnost je téměř totožná pro všechny naše dřeviny. Jedná se o hmotnost buněčných stěn bez všech otvorů. Hodnota se určuje při nulové vlhkosti a pohybuje se kolem 1500 kg.m^{-3} [1], [2], [21].

4.1.2 Objemová hmotnost dřeva

Objemovou hmotnost popisujeme v závislosti na druhu dřeva a jeho vlhkosti. Hodnoty objemové hmotnosti ve vysušeném stavu se pohybují od 400 kg.m^{-3} do 700 kg.m^{-3} . Podrobnější rozdělení dřevin podle objemové hmotnosti se nachází v tabulce č.1 [1], [2].

Tabulka 1: Rozdělení dřevin podle objemové hmotnosti [2]

Dřeviny	Objemová hmotnost sušiny	Příklad dřevin
Velmi lehké	do 400 kg.m ⁻³	vejmutovka, topol
Lehké	400 - 500 kg.m ⁻³	jedle, smrk, borovice
Mírně těžké	500 - 600 kg.m ⁻³	vrba, modřín, mahagon
Středně těžké	600 - 700 kg.m ⁻³	bříza, jasan, dub, buk
Těžké	700 - 1000 kg.m ⁻³	akát, habr
Velmi těžké	nad 1000 kg.m ⁻³	eben

4.1.3 Vlhkost dřeva

Vlhkost určujeme jako poměr hmotnosti vody k hmotnosti sušiny dřevní hmoty. Dřevo je materiál, který je schopen přijímat a odevzdávat vodu a měnit vlhkost v závislosti na okolí. Nejčastěji ji vyjadřujeme v procentech [1], [2], [4].

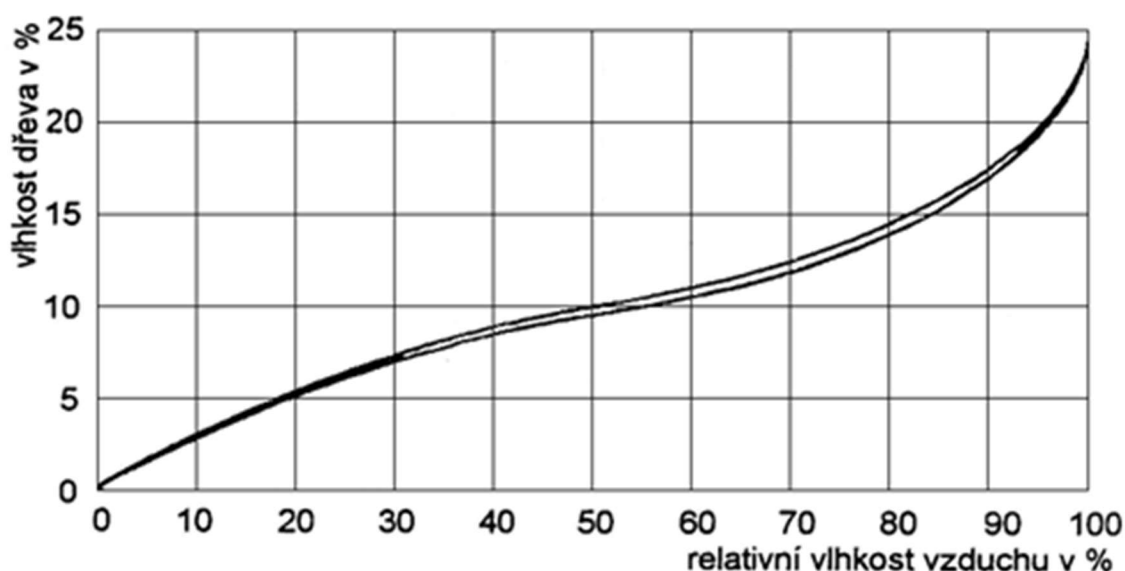
$$\omega = \frac{m_1 - m_0}{m_0} \times 100 \quad [\%],$$

kde: ω je vlhkost vzorku [%]

m_1 je hmotnost vzorku ve vlhkém stavu [g]

m_2 je hmotnost vzorku v suchém stavu [g].

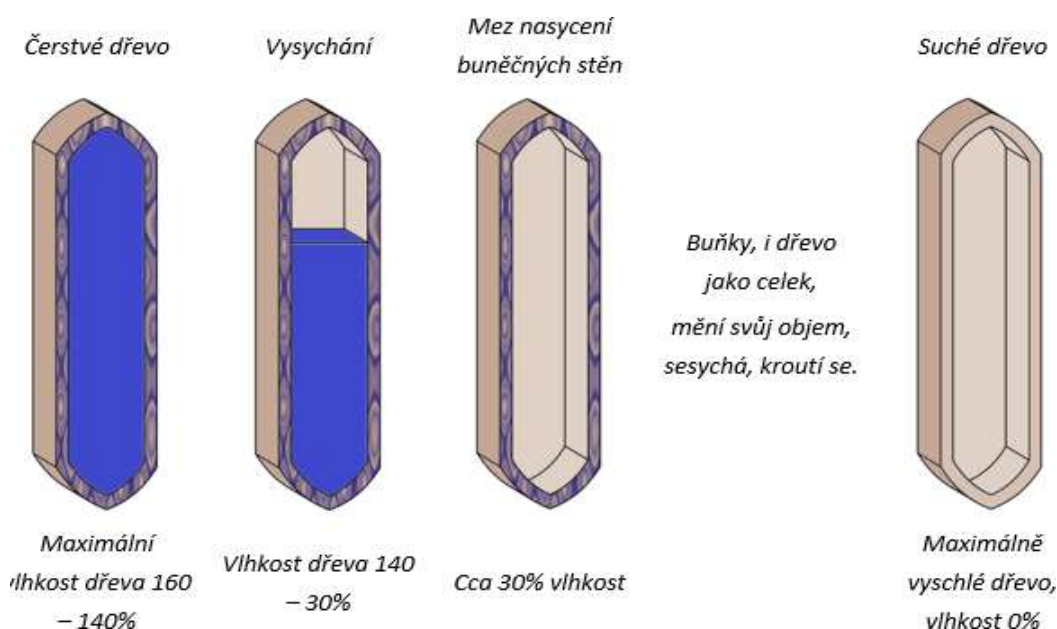
Dřevo je schopné přijímat a odevzdávat vodu z okolního prostředí. Chová se totiž jako hyroskopický materiál. Přizpůsobuje svoji vlhkost k relativní vlhkosti vzduchu [4].



Graf 1: Závislost vlhkostí dřeva na relativní vlhkosti vzduchu [27]

V živých buňkách ve dřevě vystupuje z velké části voda. Podle toho, kde se ve dřevě nachází rozlišujeme: vodu volnou, vodu vázanou a vodu chemicky vázanou. **Voda volná** se vyskytuje v dutinách uvnitř buněk a v mezibuněčných prostorech. Je vytěšňována ze dřeva jako první. Objem dřeva zůstává stejný, dochází pouze ke změně hustoty. **Voda vázaná** vyplňuje buněčné stěny. Tato voda se uvolňuje do vzduchu nebo naopak ji dřevo pohlcuje. Tento příjem nebo výdej je zodpovědný za rozměrové změny dřeva. Součástí chemického složení dřeva je **chemicky vázaná voda**. Tuto složku obsahuje i dřevo suché, neboť se uvolňuje jen během chemického zpracování dřeva [18].

Bod nasycení je stav, kdy jsou buněčné stěny plně nasyceny vodou. Obsahují tedy maximální množství vázané vody a buňky jsou zbaveny veškeré vody volné z mezibuněčných prostorů. Tato skutečnost odpovídá obvykle 30 % vlhkosti. Je-li vlhkost nižší, potom dřevo nemění svoje rozměry. Jestliže vlhkosti překročí bod nasycení, tak dochází ke změnám rozměrů a nastává bobtnání nebo sesychání dřeva. Čerstvé dřevo obsahuje vlhkost od 40 až do 170 %. Je možné ho zbavit veškeré vody, a to pouze při teplotě 103 ± 2 °C v sušárně, přirozenou cestou nelze dosáhnout úplně suchého stavu [1], [4], [18].

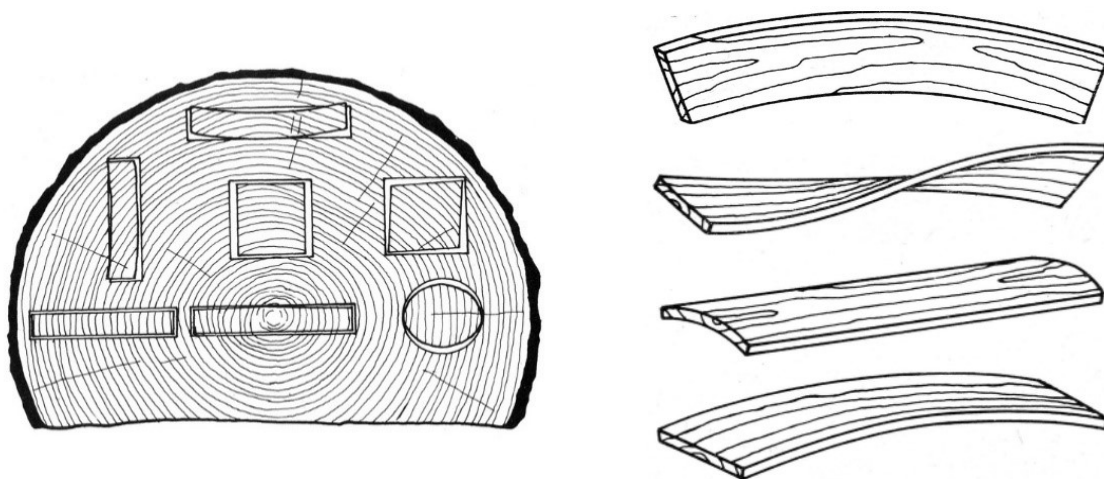


Obrázek 9: Vysychání buněk dřeva [13]

Sesychání dřeva se projevuje jako zmenšení tloušťky buněčných stěn dřeva v důsledku snižování vlhkosti. Dochází tudíž ke změně všech rozměrů (plochy i objemu) důsledkem ztráty vody vázané. Kvůli anizotropní struktuře se úbytky liší v tangenciálním, radiálním a podélném směru. V souladu s hodnotami sesychání rozdělujeme dřeva na: málo sesychává (vrba, topol, kaštan), středně sesychává (borovice, smrk, jedle, dub) a na hodně sesychává (bříza, buk, modřín, lípa) [2], [4].

Bobtnání dřeva je proces způsobený přijímáním vody z okolí, během kterého dochází ke zvětšování rozměrů, plochy, nebo objemu. Nejčastěji se vyjadřuje v procentech jako podíl zvětšených a původních rozměrů. Tato hodnota se v axiálním směru pohybuje pod hranicí 1 %, v radiálním směru mezi 3 až 6 % a v tangenciálním směru 6-12 %. Objemové bobtnání je pak součinem všech směrů [4].

Borcení dřeva je jev, který se tvoří v důsledku sesychání a bobtnání dřeva. Kvůli těmto změnám dochází k odlišnostem tvaru ve výřezu. **Příčné borcení** je způsobeno rozdílným sesycháním v radiálním a tangenciálním směru. **Podélné borcení** vyvolává nerovnoměrné sesychání dřeva v podélném směru. To se projeví jako prohnutí nebo stočení výřezu [4].



Obrázek 10: Příčné borcení (nalevo), podélné borcení (napravo) [14]

4.1.4 Hustota dřeva

Hustotou nazýváme podíl hmotnosti k objemu dřeva. Je závislá na vlhkosti.

$$\rho_{\omega} = \frac{m_{\omega}}{V_{\omega}} \quad [\text{kg/m}^3],$$

kde: ρ_{ω} je hustota dřeva

m_{ω} je hmotnost při dané vlhkosti [kg]

V_{ω} představuje objem při dané vlhkosti [m^3].

S narůstající vlhkostí se zvyšuje hustota dřeva. Roste také hmotnost a objem dřeva, ovšem jiným způsobem než hustota. Podle obsahu hustoty je možno rozdělit dřeviny na dřeva s nízkou hustotou (do 540 kg.m^{-3}), dřeva se střední hustotou ($540\text{--}750 \text{ kg.m}^{-3}$) a dřeva s vysokou hustotou (nad 750 kg.m^{-3}) [4].

4.1.5 Tepelné vlastnosti

Tepelná vodivost je u dřeva velice nepatrná, jelikož dřevo patří mezi velmi dobré tepelně izolační materiály. Vodivost dosahuje největších hodnot v podélném směru. Kolmo k vláknům je vodivost až tři krát menší [1].

Teplotní roztažnost je velice malá až zanedbatelná. Proto u dřevěných konstrukcí nemusíme posuzovat účinky teplotních změn. Součinitel α je například u smrkového dřeva podél vláken téměř šest krát menší nežli napříč vláken [1].

4.1.6 Hořlavost

Hořlavost dřeva je schopnost materiálu vzplanout, žhnout a hořet v závislosti na druhu, hustotě, složení a vlhkosti dřeva. Definiují ji tři rozhodující body. **Bod vzplanutí** se pohybuje mezi 180 a $275 \text{ }^{\circ}\text{C}$, **bod hoření** mezi 260 a $290 \text{ }^{\circ}\text{C}$ a **bod zápalnosti** se pohybuje v mezích 330 až $520 \text{ }^{\circ}\text{C}$ [4].

4.1.7 Elektrické vlastnosti dřeva

Elektrické vlastnosti dřeva jsou ve velké míře závislé na vlhkosti. Vysušené dřevo slouží jako velmi dobrý izolant. U vlhčího dřeva může částečně docházet k elektrické vodivosti. Čím větší vlhkost, tím víc se elektrický odpor snižuje [18].

4.1.8 Akustické vlastnosti dřeva

Dřevo patří mezi velmi dobré akustické materiály. Mezi vlastnosti určující souvislost dřeva a zvuku patří: zvuková vodivost, pohltivost, průzvučnost a rezonanční schopnosti [1], [18].

Zvuková vodivost dřeva souvisí s rychlostí šíření zvuku v m.s^{-1} . Je závislé na stavbě dřeva a směru šíření [18].

Pohltivost určuje množství pohlceného materiálu a nikoli odraženého. Dřevo je schopno pohltit cca 50 % dopadající energie [18].

Průzvučnost udává koeficient zvukové propustnosti, který lze stanovit jako poměr intenzity zvuku procházejícího materiálem určité tloušťky k intenzitě zvuku dopadajícího na tentýž materiál [18].

Rezonance dřeva jeho funkcí je přijímat a odrážet zvukové vlny, zesílit je tak, aby nedošlo ke změně a zkreslení tónu. Ve stavitelství se velice často používá pro úpravu akustiky v divadelních a koncertních sálech, kinech apod. [18].

4.2 Mechanické vlastnosti dřeva

Mechanické vlastnosti jsou vlastnosti dřeva související s pevností a pružností. Jedná se hlavně o pevnost v tahu, tlaku, ohybu, smyku, moduly pružnosti, houževnatost, štípatelnost, ohýbatelnost nebo tvrdost. Hodnoty se mohou výrazně odlišovat ve směru vláken a kolmo na vlákna. Tyto vlastnosti jsou závislé také na dalších okolnostech a faktorech [1]:

- **Objemová hmotnost** – se zvyšováním této hodnoty dochází k růstu mechanických vlastností dřeva.
- **Vlhkost** – mechanické hodnoty se zhoršují až do bodu nasycení (30 %), potom už vlhkost nemá podstatný vliv na tyto vlastnosti.
- **Teplota** – má vliv na změnu vlhkosti. S rostoucí teplotou se snižuje podíl vlhkosti v tělese. Výdatněji snižují pevnost společně než jednotlivě.
- **Konstrukční rozměry** – čím větší rozměry prvku, tím menší mechanické vlastnosti.
- **Vady dřeva** – ovlivňují negativně mechanické vlastnosti dřeva

- **Rychlost zatěžování** – pevnost dřeva se zvětšuje se stoupající rychlostí zatěžování.
- **Čas trvání zatížení** – při delším zatěžování, nežli je nutné, dochází ke snížení pevnosti až na 60 % [1].

4.1.1 Pružnost dřeva

Pružnost dřeva schopnost dřeva vrátit se po působení zatížení do původní polohy. Tuto vlastností se zabývá **modul pružnosti** dřeva. Ten popisuje napětí, během kterého dochází k překročení meze únosnosti, ale prvek se neporuší. Udává se v MPa. Rozlišujeme modul pružnosti pro namáhání tlakem, tahem a ohybem. Tyto hodnoty se liší jen nepatrně, proto jsou vyjádřeny jednou hodnotou. Modul pružnosti ve směru rovnoběžném s vlákny je až dvacetkrát vyšší než v příčném směru [2], [18].

4.1.2 Pevnost

Pevnost v tlaku

- **Pevnost v tlaku ve směru vláken** (axiální směr) patří meze velmi důležitou mechanickou vlastností. Vzorek je vystaven působení vnější síly (tlaku), která deformuje těleso tak, že dochází k postupnému zkracování délky dřeva. To je ovlivněno jakostí a stavbou dřeva [4].
- **Pevnost v tlaku kolmo na vlákna** se projevuje jako deformace vzorku v důsledku zhušťování struktury vláken v celém objemu. Lze ji stanovit pomocí meze úměrnosti na základně daných podmínek. Jedná se o konvenční mez pevnosti [4].

Pevnost v tahu

- **Pevnost v tahu ve směru vláken** se průměrně pohybuje kolem 120 MPa a patří mezi největší pevnosti. Jedná se o sílu, která se snaží natáhnout vzorek. Po dosažení meze pevnosti dochází k porušení uprostřed vzorku [4], [18].
- **Pevnost v tahu kolmo na vlákna** je jedna z nejmenších pevností. Hodnoty se pohybují od 1,5 do 5 MPa. Doporučuje se tuto pevnost nevyužívat při navrhování nosné konstrukce [4].

Pevnost v ohybu patří mezi nejpoužívanější a nejprokazatelnější mechanické vlastnosti. Nejčastěji se stanovuje **pevnost dřeva v ohybu v tangenciálním směru** (kolmo na vlákna) a hodnoty se pohybují kolem 100 MPa. Vzorek je podepřen a síla působí mimo místo podpor [4], [18].

Pevnost dřeva ve smyku odolává působení zatížení, které se snaží, aby se jednotlivé části posunuly po sobě aneb došlo k tzv. usmýknutí [18].

Pevnost dřeva ve vzpěru je kombinace tlakové pevnosti a pevnosti v ohybu. Nalezneme ho nejčastěji u podpůrných sloupů [18].

4.1.3 Rázová houževnatost dřeva

Dřevo je schopno odolávat síle, která namáhá prvek rázovým ohybem. Rázová houževnatost se stanoví jako energie potřebná k porušení dřeva rázovitě. Tuto vlastnost zjišťujeme například pomocí Charpyho kladiva [4], [20].

4.1.4 Tvrdost

Tvrdost se zabývá tím, do jaké míry je schopen vzorek dřeva vzdorovat pronikání dalšího tělesa. Rozlišujeme tvrdost statickou a dynamickou [4].

- **Tvrdost statická** je založena na principu vtisku ocelové kuličky určitého průměru statickým zatížením do plochy vzorku dřeva [4].
- **Tvrdost dynamická** se stanoví pomocí potenciální energie kuličky, která je puštěna z určité výšky přímo na plochu vzorku dřeva. Tuto zkoušku vyhodnotíme jako podíl této energie k otláčení, které kulička vytvoří [4].

Dřeviny, které se nacházejí na našem území, lze dělit podle tvrdosti. Ta je stanovena při 12 % vlhkosti [4].

- **Měkké** – tvrdost dosahuje hodnot 40 MPa a méně. Rýhu lze vytvořit pouhým nehtem. Do této skupiny patří na příklad smrk, jedle, borovice, topol, lípa [4].
- **Středně tvrdé** – tvrdost se pohybuje mezi 40 až 80 MPa. Rýha už není tolik výrazná. Jedná se o dřeva jako je: jasan, dub či ořech [4].
- **Tvrdé** – tvrdost je větší než 80 MPa. Tady patří habr, akát, tis [4].

4.1.5 Štípatelnost dřeva

Štípatelnost dřeva se projevuje jako schopnost rozdělit se na více částí pomocí klínu. Velikou roli hraje směr vláken, vlhkost dřeva, objemová hmotnost nebo stavba dřeva [18].

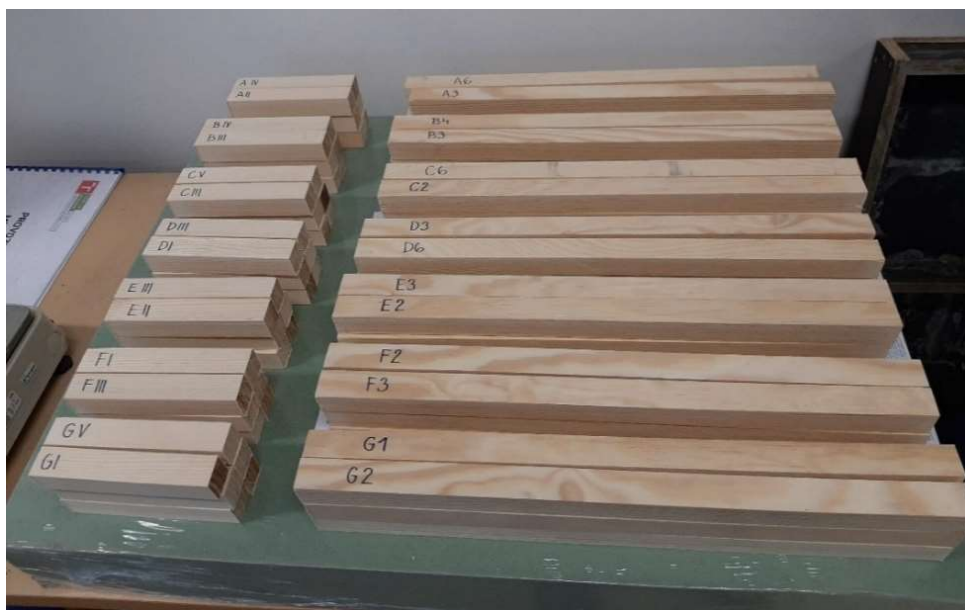
4.1.6 Ohýbatelnost

Ohýbatelností dřeva můžeme nazvat schopnost materiálu ohnout se pod vlivem zatížení (přijmout nový tvar) a zůstat v této poloze i přes to, že zatížení už nepůsobí. Tato schopnost se projevuje díky výskytu ligninu ve dřevě. Dřevo můžeme deformovat vlivem tepla s vlhkem nebo chemicky. Aby materiál zůstal v dané poloze musí se následně vysušit [18].

5 PRAKTICKÁ ČÁST

5.1. Výběr vzorků

Do experimentální části bylo vybráno 14 sad po 6 vzorcích ze smrkového dřeva. Ty byly následně rozděleny do 2 skupin. První skupina 7 sad byla označena římskými číslicemi s rozměry 25 mm x 25 mm x 150 mm. Druhá skupina 7 sad měla arabské číslice a rozměry 25 mm x 25 mm x 475 mm. U všech rozměrů byly přípustné mírné odchylky. Vzorky byly vybírané tak, aby neobsahovaly vady jako např. suky, kůru nebo hnilobu. Nesměly také jevit známky napadení škůdci.



Obrázek 11: Fotodokumentace zkušebních vzorků

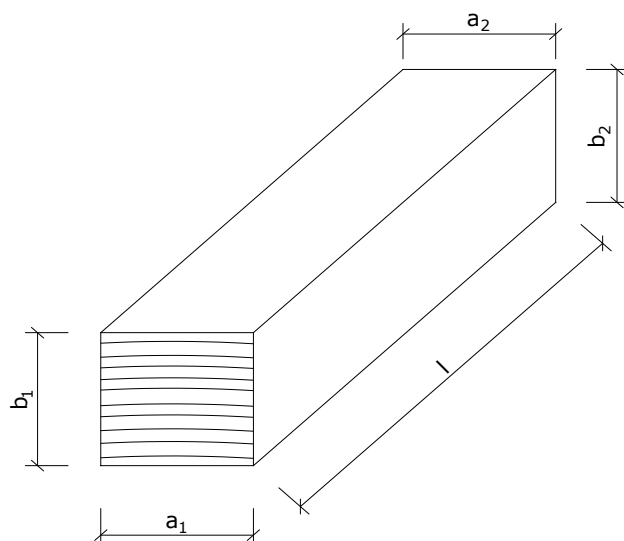
6.2. Sušení a měření vysušených vzorků

Všechny vzorky byly vloženy do horkovzdušné sušárny o teplotě $105\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ a postupně vysušeny až do ustálené hmotnosti a rozměrů, tak aby rozdíl mezi dvěma po sobě naměřenými hodnotami v rozmezí 2 hodin byl menší než 0,1 %.

Hmotnost se změřila na laboratorní digitální váze s přesností na 0,01 g podle příslušné normy tzn. bezprostředně po vytáhnutí z horkovzdušné sušárny. Příslušné hodnoty pro jednotlivé vzorky byly zapsány v tabulkách v příloze č.1.

Délka vzorků „c“ byla měřena pomocí digitálního posuvného měřítka s rozsahem 0-500 mm. Příčné rozměry „a“ (radiální směr) a „b“ (tangenciální směr) byly stanoveny hodnotami na koncích vzorků digitálním posuvným měřítkem s rozsahem

0–200 mm a následně byly zprůměrovány. Měření bylo provedeno dle příslušné normy s přesností $\pm 1 \%$. Všechny rozměry pro jednotlivé vzorky byly zaznamenány v tabulkách v příloze č. 1.



Obrázek 12: Rozměry zkušebního vzorku

6.3 Vlhčení a měření vzorků

Sada A byla zkoušena ihned po vytáhnutí ze sušárny tzn. při vlhkosti, která byla rovna nule, a proto nebylo potřeba tyto vzorky vystavit působení vlhkosti. Zbýlých šest sad vzorků bylo vloženo do vody. Jednotlivé sady byly postupně, s dostatečnými rozestupy vytahovány tak, aby obsahovaly jiný stupeň nasycení. Délka ponoření ve vodě byla od 48 hodin až po dobu několika týdnů.



Obrázek 13: Fotodokumentace vlhčení zkušebních vzorků

Vzorky, které byly namáčeny nejdéle, musely být zatíženy, aby neplavaly na hladině a přijaly dostatečné množství vody až do bodu plného nasycení.

Ihned po vyjmutí z vody byly všechny vzorky jednotlivých sad znovu zváženy a přeměřeny všechny jejich rozměry, a to stejným způsobem, jak ve vysušeném stavu. Způsob je uveden v kapitole 6.2 této práce. Všechny hodnoty byly uvedeny v tabulkách v příloze č. 2.

6.4 Stanovení vlhkosti váhovou metodou

Vlhkost byla stanovena podle normy ČSN EN 13183-1. Jedná se o váhovou metodu, kterou můžeme vyjádřit podílem hmotnosti vody k hmotnosti dřeva ve vysušeném stavu. Vlhkost ω se vypočítá podle vztahu [22]:

$$\omega = \frac{m_1 - m_0}{m_0} \times 100 \quad [\%],$$

kde: ω je vlhkost vzorku [%]

m_1 je hmotnost vzorku ve vlhkém stavu [g]

m_2 je hmotnost vzorku v suchém stavu [g].

Tabulka 2: Vypočtené hodnoty vlhkosti jednotlivých vzorků

č. vz.	ω [%]	č. vz.	ω [%]	č. vz.	ω [%]	č. vz.	ω [%]	č. vz.	ω [%]	č. vz.	ω [%]
BI	12,30	B1	6,70	CI	20,46	C1	14,72	DI	34,14	D1	25,20
BII	11,63	B2	6,77	CII	19,48	C2	18,03	DII	27,92	D2	32,66
BIII	10,17	B3	5,05	CIII	18,56	C3	14,18	DIII	26,17	D3	26,77
BIV	11,05	B4	5,35	CIV	18,57	C4	23,00	DIV	25,79	D4	27,19
BV	15,11	B5	15,93	CV	22,26	C5	18,68	DV	30,36	D5	25,75
BVI	15,77	B6	5,28	CVI	21,67	C6	21,16	DVI	25,55	D6	27,91
průměr	12,67	průměr	7,51	průměr	20,17	průměr	18,30	průměr	28,32	průměr	27,58
č. vz.	ω [%]	č. vz.	ω [%]	č. vz.	ω [%]	č. vz.	ω [%]	č. vz.	ω [%]	č. vz.	ω [%]
EI	32,39	E1	37,36	FI	48,58	F1	67,05	GI	77,23	G1	85,87
EII	33,40	E2	49,89	FII	45,03	F2	60,81	GII	69,66	G2	91,58
EIII	33,83	E3	51,81	FIII	47,64	F3	67,68	GIII	70,92	G3	86,54
EIV	33,86	E4	37,84	FIV	43,56	F4	62,56	GIV	96,37	G4	93,47
EV	48,53	E5	38,38	FV	64,02	F5	82,96	GV	107,00	G5	133,46
EVI	26,53	E6	46,76	FVI	43,87	F6	63,85	GVI	76,52	G6	81,65
průměr	34,76	průměr	43,67	průměr	48,78	průměr	67,49	průměr	82,95	průměr	95,43

6.5 Hustota dřeva

6.5.1 Stanovení hustoty dřeva

Hustota vzorku řeziva byla stanovena podle normy ČSN 49 0108. Hustota zkušebního vzorku při vlhkosti ω se vyjádřila jako podíl jeho hmotnosti k objemu dřeva [23].

$$\rho_{\omega} = \frac{m_{\omega}}{a_{\omega} \times b_{\omega} \times c_{\omega}} = \frac{m_{\omega}}{V_{\omega}} \quad [\text{kg/m}^3],$$

kde: ρ_{ω} je hustota zkušebního vzorku [kg/m^3]

m_{ω} je hmotnost vzorku ve vlhkém stavu [kg]

$a_{\omega}, b_{\omega}, c_{\omega}$ jsou rozměry vzorku při vlhkosti ω [m]

V_{ω} je objem zkušebního vzorku při vlhkosti ω [m^3].

Hustota dřeva byla stanovena pro každý vzorek, a to vždy pro zcela vysušený stav a pro stav při vlhkosti ω v době zkoušky. Všechny vypočítané hodnoty jsou uvedeny v tabulkách příloze č. 6.

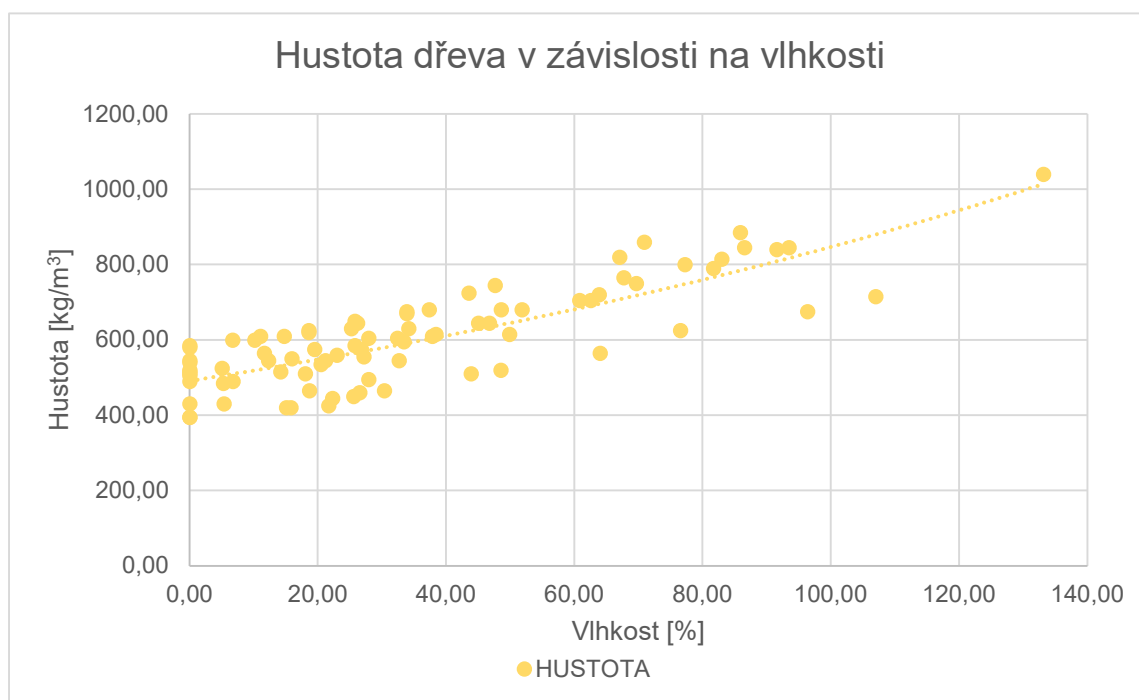
6.5.2 Hustota dřeva v závislosti na vlhkosti

V následující tabulce se nacházejí hodnoty hustoty pro jednotlivé vzorky. Tyto hodnoty jsou zaokrouhlené na 5 kg/m^3 a jsou naměřené na vzorkách nasycených vodou. Pro stav s nulovým nasycením byly použity vypočítané hodnoty hustot u vzorků ve zcela vysušeném stavu (vzorky A). Pod tabulkou se nachází graf, který zobrazuje vliv změny vlhkosti na hustotu dřeva.

Tabulka 3: Vypočítané hodnoty hustoty pro jednotlivé vzorky

č. vz.	ρ [kg/m^3]	č. vz.	ρ [kg/m^3]	č. vz.	ρ [kg/m^3]	č. vz.	ρ [kg/m^3]	č. vz.	ρ [kg/m^3]
AI	520,00	A1	580,00	BI	545,00	B1	600,00	CI	535,00
AII	545,00	A2	540,00	BII	565,00	B2	490,00	CII	575,00
AIII	515,00	A3	490,00	BIII	600,00	B3	525,00	CIII	625,00
AIV	585,00	A4	505,00	BIV	610,00	B4	430,00	CIV	620,00
AV	395,00	A5	430,00	BV	420,00	B5	550,00	CV	445,00
AVI	395,00	A6	510,00	BVI	420,00	B6	485,00	CVI	425,00
průměr	492,50	průměr	509,17	průměr	526,67	průměr	513,33	průměr	537,50

č. vz.	ρ [kg/m ³]	č. vz.	ρ [kg/m ³]	č. vz.	ρ [kg/m ³]	č. vz.	ρ [kg/m ³]	č. vz.	ρ [kg/m ³]
C1	610,00	DI	630,00	D1	630,00	EI	605,00	E1	680,00
C2	510,00	DII	605,00	D2	545,00	EII	595,00	E2	615,00
C3	515,00	DIII	645,00	D3	575,00	EIII	675,00	E3	680,00
C4	560,00	DIV	650,00	D4	555,00	EIV	670,00	E4	610,00
C5	465,00	DV	465,00	D5	585,00	EV	520,00	E5	615,00
C6	545,00	DVI	450,00	D6	495,00	EVI	460,00	E6	645,00
průměr	534,17	průměr	574,17	průměr	564,17	průměr	587,50	průměr	640,83
č. vz.	ρ [kg/m ³]	č. vz.	ρ [kg/m ³]	č. vz.	ρ [kg/m ³]	č. vz.	ρ [kg/m ³]	č. vz.	ρ [kg/m ³]
FI	680,00	F1	820,00	GI	800,00	G1	885,00		
FII	645,00	F2	705,00	GII	750,00	G2	840,00		
FIII	745,00	F3	765,00	GIII	860,00	G3	845,00		
FIV	725,00	F4	705,00	GIV	675,00	G4	845,00		
FV	565,00	F5	815,00	GV	715,00	G5	1040,0		
FVI	510,00	F6	720,00	GVI	625,00	G6	790,00		
průměr	645,00	průměr	755,00	průměr	737,50	průměr	874,17		



Graf 2: Závislosti hustoty dřeva na vlhkosti

Graf nám ukazuje, že hustota dřeva roste s narůstající vlhkostí dřeva. Proložená křivka je ve tvaru exponenciály. Můžeme říct, že hustota dřeva se zvyšuje s vlhkostí, ale ne lineárně, protože hmotnost a objem dřeva nerostou stejným způsobem. Odchylny hodnot některých vzorků jsou způsobeny různou strukturou a texturou zkoumaných těles nebo nedostatečným počtem zkušebních vzorků.

6.6 Bobtnání dřeva

6.6.1 Výpočet bobtnání

Bobtnání bylo stanoveno podle normy ČSN 49 0126 pro všechny směry (radiální, tangenciální, axiální). Bylo vypočítáno z rozměrů ve vysušeném stavu a z rozměrů vzorků, které jsou nasyceny vodou. Výpočet pro jednotlivé vzorky byl proveden podle vztahu [24]:

$$\alpha_{i\ max} = \frac{l_{i\ max} - l_{i\ min}}{l_{i\ min}} \times 100 \quad [\%],$$

kde: $\alpha_{i\ max}$ je hodnota bobtnání v příslušném směru [%]

$l_{i\ max}$ je rozměr pro příslušný směr vlhkého vzorku [mm]

$l_{i\ min}$ je rozměr pro příslušný směr vysušeného vzorku [mm].

Objemové bobtnání bylo stanoveno:

$$\alpha_{V\ max} = \frac{(l_{r\ max} \times l_{t\ max} \times l_{a\ max}) - (l_{r\ min} \times l_{t\ min} \times l_{a\ min})}{(l_{r\ min} \times l_{t\ min} \times l_{a\ min})} \times 100$$

kde: $\alpha_{V\ max}$ je hodnota objemového bobtnání [%]

$l_{i\ max}$ je rozměr pro příslušný směr vlhkého vzorku [mm]

$l_{i\ min}$ je rozměr pro příslušný směr vysušeného vzorku [mm].

Vypočtené hodnoty bobtnání v radiálním (r), tangenciálním (t) a axiálním (a) směru i objemové bobtnání je uvedeno v tabulkách v příloze č. 5.

Vzorky A byly zkoušeny ve vysušeném stavu, a hodnoty bobtnání tedy odpovídaly nulovým hodnotám.

6.6.2 Závislost bobtnání na vlhkosti

V tabulce 4, uvedené na následující straně, jsou znázorněny pouze aritmetické průměry pro jednotlivé vzorky. Tabulka také obsahuje vyhodnocené minimální a maximální hodnoty, aritmetický průměr pro příslušný směr (podélný, radiální, tangenciální) a objemové bobtnání pro lepší porovnání hodnot bobtnání pro jednotlivé směry.

Tabulka 4: Průměrné hodnoty bobtnání v různých směrech pro jednotlivé sady

průměr ze vzorku	PODÉLNÉ [%]	TANGENCIÁLNÍ [%]	RADIÁLNÍ [%]	OBJEMOVÉ [%]
B	0,21	3,25	3,25	6,84
C	0,40	5,71	4,80	11,23
D	0,34	7,43	5,86	14,11
E	0,29	8,28	6,55	15,51
F	0,28	8,66	6,32	15,75
G	0,27	8,76	6,56	16,19
průměr	0,30	7,02	5,56	13,27
max	0,40	8,76	6,56	16,19
min	0,21	3,25	3,25	6,84

Z tabulky je patrné, že bobtnání se liší v jednotlivých směrech. To je způsobeno tvarovými změnami.

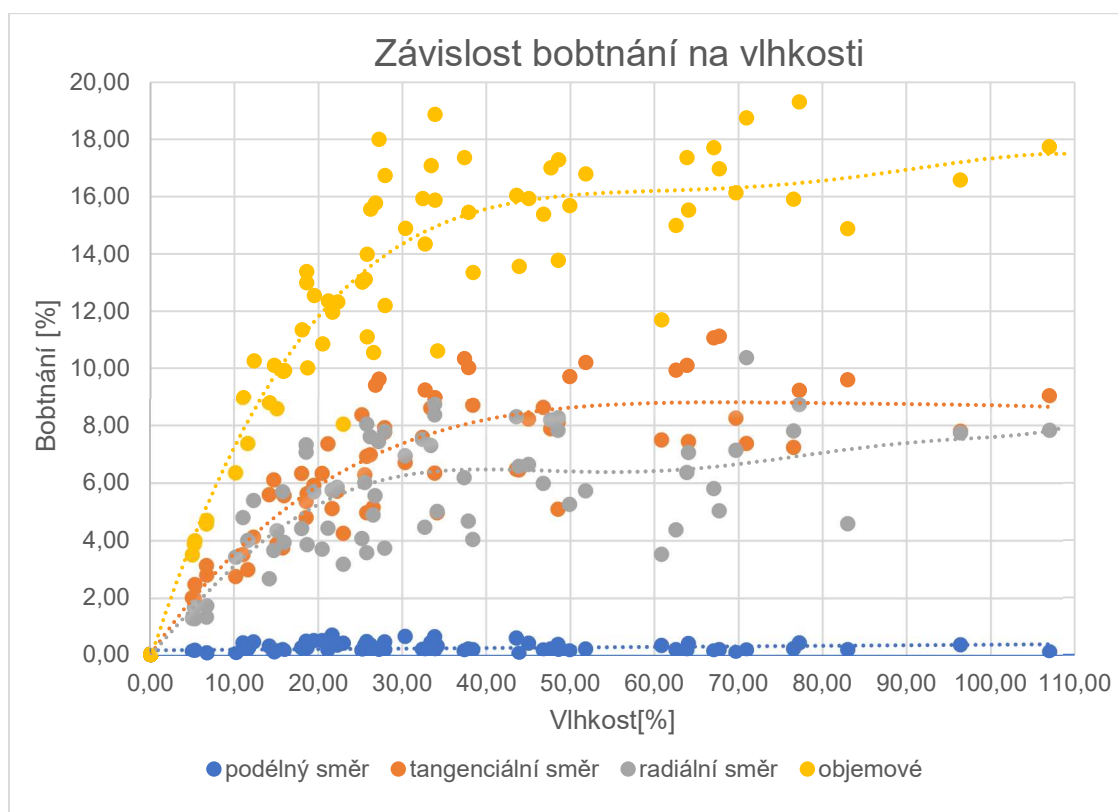
Nejmenších hodnot dosahuje těleso v podélném směru. V našem případě průměrná hodnota tohoto bobtnání se rovná 0,3 %. Správně by se tato hodnota měla pohybovat od 0,1 % až 0,4 %, což tyto vzorky splňují.

Tangenciální bobtnání by mělo vycházet mezi 6 % až 12 %. Průměrná hodnota vzorků zkoušených v této práci je 7,02 %, leží tedy v předpokládaných mezích.

Radiální bobtnání by se mělo pohybovat mezi 3 % až 6 %. V našem případě průměrná hodnota je 5,56 %, což tyto vzorky splňují.

Objemové bobtnání se pohybuje kolem 13 %.

Na další straně je zobrazen graf, který obsahuje všechny vypočítané hodnoty radiálního, tangenciálního, axiálního a objemového bobtnání, tak aby byl co nejpresnější. Jednotlivé bobtnání je proloženo křivkou, aby byl patrnější tvar závislosti vlhkosti na bobtnání v jednotlivých směrech.



Graf 3: Závislost bobtnání na vlhkosti

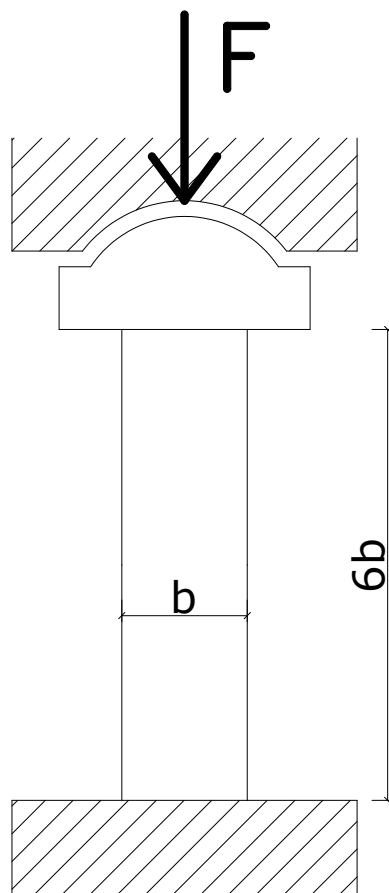
Z grafu lze vyčíst, že se hodnoty bobtnání v různých anatomických směrech liší. Nejmenší hodnoty byly stanoveny v podélném směru, následně v radiálním, poté tangenciálním a největších hodnot dosahovaly vzorky při objemovém bobtnání. Tvar křivky je velice podobný ve všech případech. Všechny hodnoty výrazně rostou s vlhkostí až do hodnoty cca 30 %. Tento bod odpovídá hodnotě bodu nasycení buněčných stěn. Od tohoto bodu by hodnoty bobtnání neměly růst se zvětšující se vlhkostí a charakter křivky by měl být lineární. Nepatrné odchylky jsou způsobeny menším počtem zkoušených těles a možnými drobnými vadami či nedokonalostmi jednotlivých vzorků.

6.6 Pevnost v tlaku

6.6.1 Zkoušení vzorků v tlaku rovnoběžně s vlákny

Zkouška byla provedena dle normy ČSN EN 408. Vzorky byly zvoleny tak, aby odpovídaly rozměrům zkušebního tělesa pro stanovení pevnosti v tlaku rovnoběžně s vlákny. Průřez konstrukčního prvku musí být plný, a délka by měla odpovídat šestinásobku menšího průřezového rozměru [25].

Zkušební těleso bylo v lisu zatěžováno dostředným tlakem pomocí desky opatřené kulovým kloubem. Zatěžování se provádělo rovnoměrnou konstantní rychlostí až do porušení vzorku. Následně byla odečtena maximální síla F_{\max} , která byla dosažena během porušení vzorku. Tyto hodnoty byly zapsány v tabulkách v příloze č. 3. [25].



Obrázek 14: Fotodokumentace a schéma zkoušky pevnosti v tlaku

6.6.2 Vliv vlhkosti na pevnost v tlaku

Během zkoušky v tlaku rovnoběžně s vlákny byly zjištěny maximální hodnoty zatěžovací síly pro všechny vzorky, které byly zaznamenány do tabulky v příloze č. 3. Pomocí této maximální síly a plochy vzorku byla stanovena a následně uvedena s přesností 1 % pevnost v tlaku rovnoběžně s vlákny dle vzorce [25]:

$$f_{c,0} = \frac{F_{\max}}{A} \quad [\text{MPa}],$$

kde F_{\max} je maximální zatěžovací síla při zkoušce [N]

A je zatěžovací plocha [mm²]

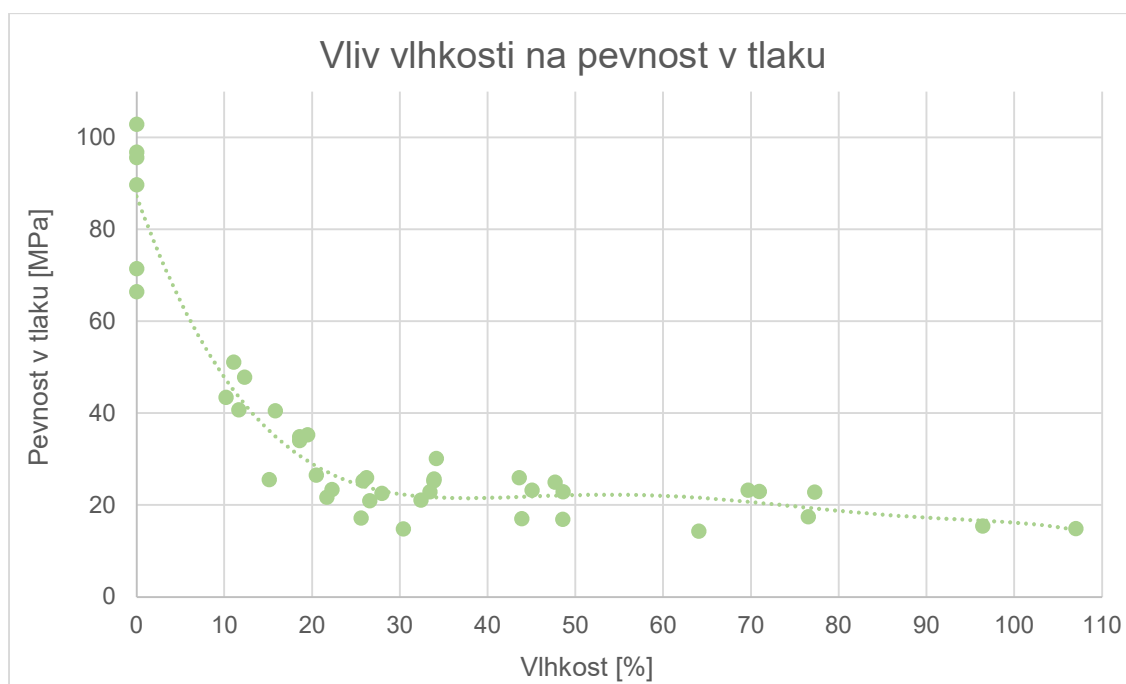
$f_{c,0}$ je pevnost v tlaku rovnoběžně s vlákny [N/mm²].

Vypočítané hodnoty jsou uvedeny níže v tabulce 5. Představují hodnoty pro jednotlivé vzorky při různých stavech nasycení vodou. Pro každou sadu vzorků je stanoven průměr pro přehlednější srovnání. Největší pevnost dosahují vzorky A, které jsou uvažovány s nulovou vlhkostí. Jejich průměrná pevnost je rovna 87,12 MPa. Nejmenších hodnot dosahují vzorky G, které reprezentují vzorky nejvíce nasycené vodou. Tato sada vzorků má průměrnou hodnotu 19,42 MPa.

Tabulka 5: Vypočítané hodnoty pevnosti v tlaku pro jednotlivé vzorky

č. vz.	$f_{c,0}$ [MPa]	č. vz.	$f_{c,0}$ [MPa]	č. vz.	$f_{c,0}$ [MPa]	č. vz.	$f_{c,0}$ [MPa]
AI	89,68	BI	47,79	CI	26,50	DI	30,14
AII	102,81	BII	40,66	CII	35,24	DII	22,52
AIII	96,81	BIII	43,44	CIII	34,82	DIII	25,89
AIV	95,62	BIV	51,07	CIV	34,00	DIV	25,22
AV	71,39	BV	25,52	CV	23,32	DV	14,79
AVI	66,42	BVI	40,50	CVI	21,64	DVI	17,12
průměr	87,12	průměr	41,50	průměr	29,25	průměr	22,61
č. vz.	$f_{c,0}$ [MPa]	č. vz.	$f_{c,0}$ [MPa]	č. vz.	$f_{c,0}$ [MPa]	č. vz.	$f_{c,0}$ [MPa]
EI	21,01	FI	22,86	GI	22,75		
EII	22,84	FII	23,24	GII	23,19		
EIII	25,20	FIII	24,92	GIII	22,90		
EIV	25,63	FIV	25,92	GIV	15,37		
EV	16,88	FV	14,27	GV	14,88		
EVI	20,89	FVI	17,00	GVI	17,43		
průměr	22,08	průměr	21,37	průměr	19,42		

Je tedy patrné, že se pevnost v tlaku rovnoběžně s vlákny mění s narůstající vlhkostí. Pro přehlednější zobrazení se na následující straně nachází graf, ve kterém jsou zahrnuty vypočítané hodnoty pevnosti pro všechny zkušební tělesa. Graf je proložen křivkou tak, aby byl patrnější charakter této závislosti.



Graf 4: Vliv vlhkosti na pevnosti v tlaku

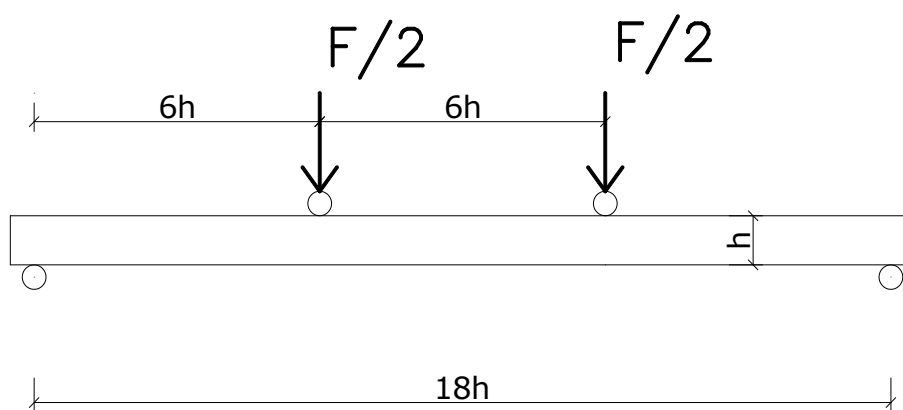
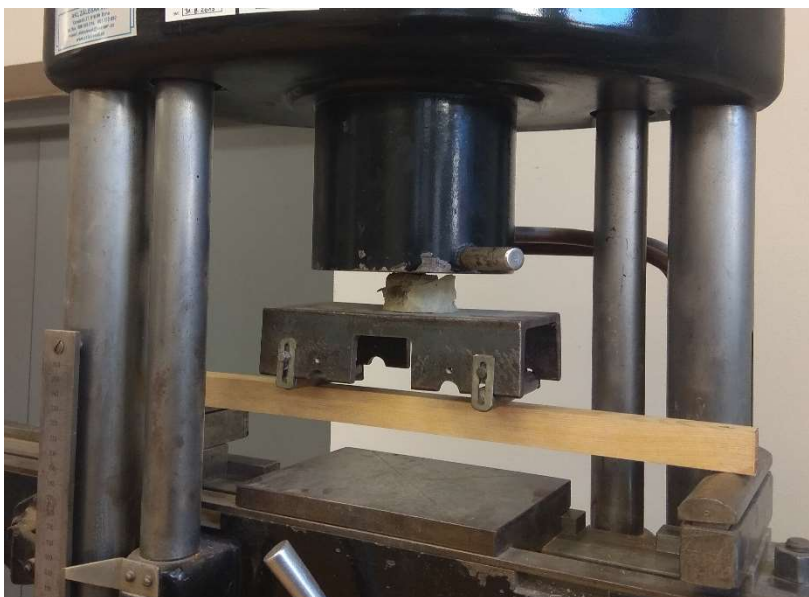
Z grafu je možné vyčíst, že pevnost v tlaku výrazně klesá s narůstající vlhkostí až do bodu nasycení buněčných stěn (v mezích od 30 do 40 %). U vzorků s větší mírou nasycení se pevnost téměř nemění a je konstantní. Větší odchylky od křivky mohou být způsobeny drobnými nedokonalostmi vzorku nebo menším počtem zkušebních těles.

6.7 Pevnost v tahu

6.7.1 Zkoušení vzorků v tahu za ohybu

Zkouška byla provedena dle normy ČSN EN 408. Zkušební těleso bylo prostě podepřeno a zatěžováno na ohyb až do momentu porušení symetricky dvěma zatěžovacími břemeny. Délka vzorku by měla odpovídat devatenáctinásobku výšky průřezu [25].

Zatěžování zkušebního tělesa probíhalo symetricky čtyřbodovým ohybem rovnoměrně s konstantní rychlostí až do porušení vzorku. Následně byla odečtena maximální síla F_{\max} . Během zkoušení byly rozlišeny dva anatomické směry, a to radiální pro vzorky 1-3 a tangenciální pro vzorky 4-6. Všechny hodnoty jsou zaznamenány v tabulkách v příloze č. 4. a jednotlivé směry jsou rozlišeny barevně.



Obrázek 15: Fotodokumentace a schéma zkoušky pevnosti v tahu za ohybu

6.7.2 Vliv vlhkosti na pevnost v tahu za ohybu

Pevnost v tahu byla stanovena pro všechny vzorky s různými vlhkostními stavy, a to pomocí vztahu [25]:

$$f_m = \frac{F_{\max} \times l}{b \times h^2} \quad \text{resp.} \quad f_m = \frac{F_{\max} \times l}{h \times b^2} \quad \text{pro tang. směr} \quad [\text{MPa}],$$

kde F_{\max} je maximální zatěžovací síla při zkoušce [N]

l je délka vzorku [mm]

h , b jsou příčné rozměry vzorku [mm]

f_m je pevnost v tahu za ohybu [N/mm^2].

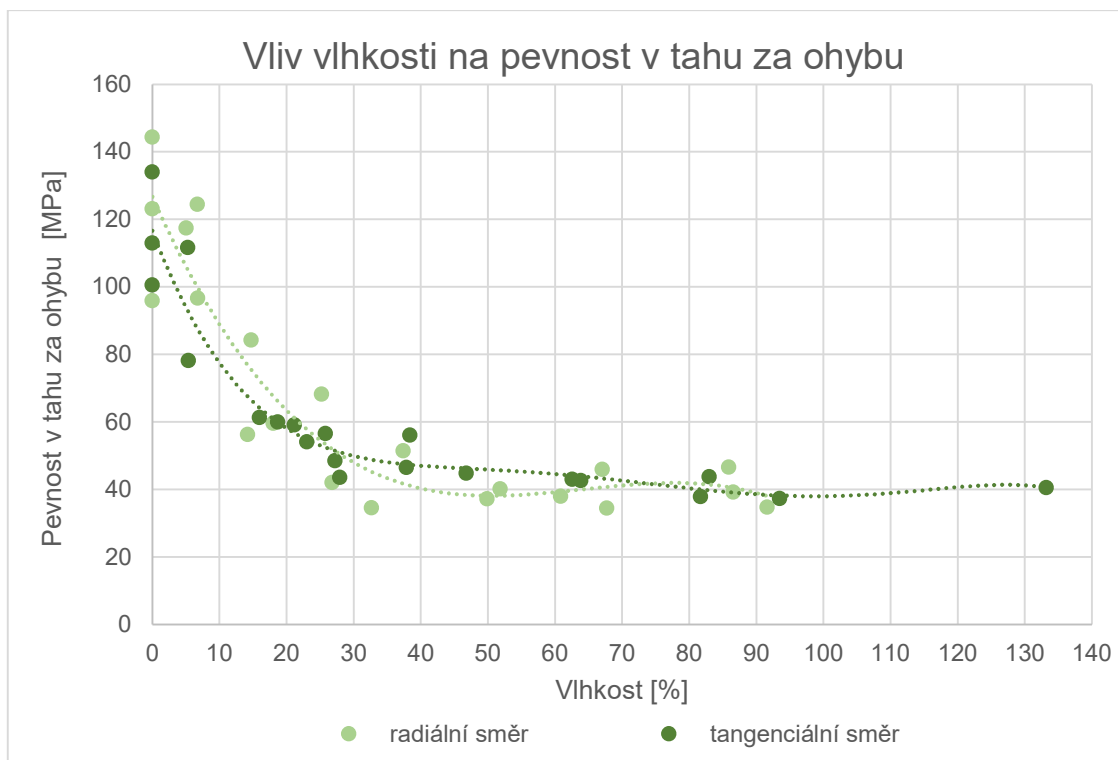
Vypočítané hodnoty se nacházejí v tabulce 6. Barevně jsou rozlišeny hodnoty pro radiální a tangenciální směr. Největších hodnot dosahují jak v radiálním tak v tangenciálním směru vzorky A, které jsou zcela vysušené, tedy vlhkost je rovna 0 %. Nejmenší hodnoty byly naměřeny u vzorků G. Tyto vzorky reprezentují zkoušební tělesa, které obsahují největší množství vody. Je tedy patrné, že pevnost se mění v závislosti na vlhkosti.

Tangenciální pevnost by měla být větší než radiální. Toto pravidlo není úplně potvrzeno těmito vzorky. Neměřené hodnoty jsou si velice podobné a výrazně se od sebe neliší. To je způsobeno menším počtem vzorku a možnými menšími vadami nebo kvalitou zkušebních těles.

Tabulka 6: Vypočítané hodnoty pevnosti v tahu za ohybu pro jednotlivé vzorky

č. vz.	f_m [MPa]	č. vz.	f_m [MPa]	č. vz.	f_m [MPa]	č. vz.	f_m [MPa]
A1	144,39	B1	124,45	C1	84,27	D1	68,27
A2	123,17	B2	96,69	C2	59,61	D2	34,54
A3	95,97	B3	117,44	C3	56,31	D3	42,07
A4	100,55	B4	78,23	C4	54,14	D4	48,51
A5	113,02	B5	61,30	C5	59,99	D5	56,59
A6	134,03	B6	111,70	C6	59,17	D6	43,58
prum _{rad}	121,18	prum _{rad}	112,86	prum _{rad}	66,73	prum _{rad}	48,29
prum _{tang}	115,87	prum _{tang}	83,74	prum _{tang}	57,77	prum _{tang}	49,56
č. vz.	f_m [MPa]	č. vz.	f_m [MPa]	č. vz.	f_m [MPa]	č. vz.	f_m [MPa]
E1	51,46	F1	45,92	G1	46,63		
E2	37,22	F2	37,98	G2	34,71		
E3	40,19	F3	34,47	G3	39,24		
E4	46,56	F4	42,96	G4	37,32		
E5	56,13	F5	43,79	G5	40,58		
E6	44,82	F6	42,61	G6	37,91		
prum _{rad}	42,96	prum _{rad}	39,46	prum _{rad}	40,19		
prum _{tang}	49,17	prum _{tang}	43,12	prum _{tang}	38,60		

Na následující straně se nachází graf, ve kterém jsou zahrnuty všechny vypočítané hodnoty pro všechny vzorky. Graf představuje vliv vlhkosti na pevnost v tahu za ohybu. Jednotlivé směry jsou rozlišeny barevně pro lepší přehlednost. Tangenciální i radiální směr je proložený křivkou tak, aby lépe zobrazoval průběh této závislosti.



Graf 5: Vliv vlhkosti na pevnost v tahu za ohybu

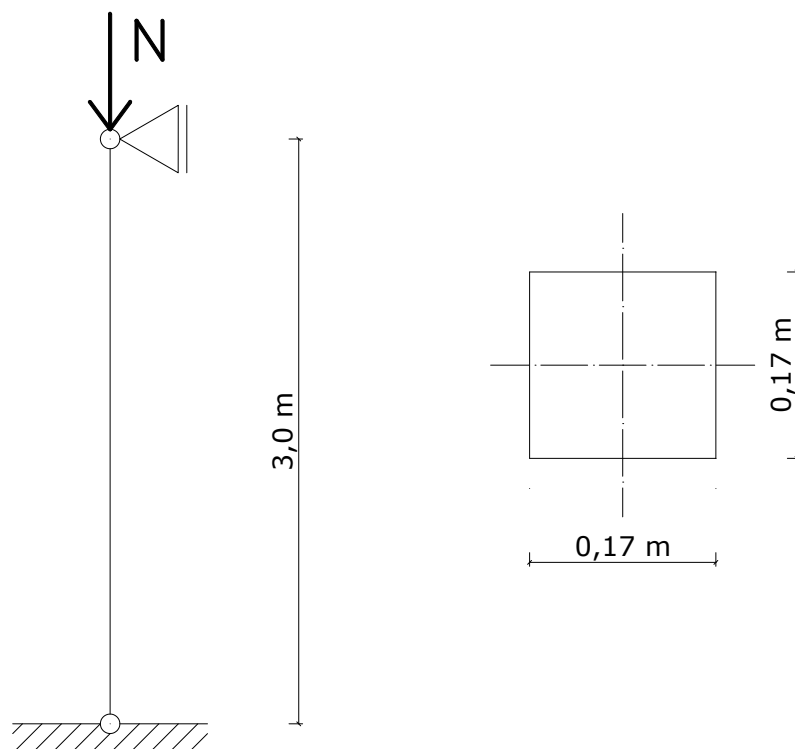
Z grafu je patrné že obě křivky mají podobný tvar. To znamená, že vzorek se chová stejně bez ohledu na to, v jakém směru je zatěžován. Křivky výrazně klesají až do bodu nasycení buněčných stěn, co odpovídá 30 až 40 % stavu. Potom pevnost výrazně nemění a mají charakter lineární přímky. Odchyly jsou způsobeny menším počtem zkušebních vzorku a možným nedokonalostem.

6.8 Ověření závislosti pevnosti v tlaku vlivem vlhkosti

6.8.1 Statický výpočet

Posuzován bude prvek oboustranně kloubově uložený o délce 3,0 m. Průřez má tvar čtverce o rozměrech 170 x 170 mm. Jedná se o rostlé dřevo, tedy součinitel β_c se rovná 0,2. Sloup můžeme idealizovat jako oboustranně kloubově uložený prut o délce $L = 3,0$ m (viz obrázek). Délka prutu L se rovná i kritickým délkám prvku $L_{cr,y}$ a $L_{cr,z}$, protože součinitel β , který zohledňuje druh uložení, se rovná jedné. Třída C30 je garantována dodavatelem. Na sloup působí normálová síla $N_{Ed} = 160$ kN a trvání zatížení uvažujeme jako střednědobé. Prvek se nachází v exteriéru (třída provozu 3). Modifikační součinitel k_{mod} se rovná 0,65 a zohledňuje se při výpočtu pevnosti dřeva.

Sloup bude posuzován ve dvou stavech nasycení. Při běžné vlhkosti dřeva, v tomto případě při vlhkosti 12,67 % a následně při stavu nasycení, které představuje prvek po zatopení během povodní a to 82,95 %.



Obrázek 16: Statické schéma a průřez posuzovaného prvku

Vstupní údaje:

Průřez sloupu: 170 x 170 mm

Délka prvku: $L = 3,0 \text{ m} = L_{cr,y} = L_{cr,z}$

Zatřídění dřeva: C30

Normálová síla $N_{Ed} = 160 \text{ kN}$

Součinitel $\beta_c = 0,2$ (rostlé dřevo)

Modifikační součinitel $k_{mod} = 0,65$

Dílčí součinitel vlastností materiálu $\gamma_m = 1,3$ (rostlé dřevo)

Modul pružnosti $E_{0,05} = 8,0 \text{ GPa}$

Pevnost materiálu v tlaku $f_{c,0,k} = 23 \text{ MPa}$

Výpočet plochy průřezu:

$$A = a \times b = 0,17 \times 0,17 = 0,0289 \text{ m}^2$$

Výpočet momentu setrvačnosti:

$$I_y = I_z = \frac{1}{12} \times a \times b^3 = \frac{1}{12} \times 0,17 \times 0,17^3 = 6,960 \times 10^{-5} \text{ m}^4$$

Výpočet poloměru setrvačnosti:

$$i_y = i_z = \sqrt{\frac{I_y}{A}} = \sqrt{\frac{6,960 \times 10^{-5}}{0,0289}} = 0,0491 \text{ m}$$

Výpočet normálového napětí v průřezu:

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{N_{ed}}{A} = \frac{160}{0,0289} = 5\,536,33 \text{ kPa} = 5,536 \text{ MPa}$$

Výpočet štíhlosti:

$$\lambda_z = \lambda_y = \frac{L_{cr,y}}{i_y} = \frac{3,0}{0,0491} = 61,099 \text{ kPa}$$

Výpočet kritického napětí:

$$\sigma_{c,crit,y} = \sigma_{c,crit,z} = \frac{\pi^2 \times E_{0,05}}{\lambda_y^2} = \frac{\pi^2 \times 8,0 \times 10^3}{61,099^2} = 21,151 \text{ MPa}$$

Výpočet relativního štíhlostního poměru:

$$\lambda_{rel,y} = \lambda_{rel,z} = \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{\sigma_{c,crit,y}}} = \sqrt{\frac{23}{21,151}} = 1,043$$

Výpočet součinitele k:

$$\begin{aligned} k_y = k_z &= 0,5 \times [1 + \beta_c \times (\lambda_{rel} - 0,3) + \lambda_{rel}^2] \\ &= 0,5 \times [1 + 0,2 \times (1,043 - 0,3) + 1,043^2] = 1,118 \end{aligned}$$

Výpočet součinitele vzpěrnosti:

$$k_{c,y} = k_{c,z} = \frac{1}{k + \sqrt{k^2 - \lambda_{rel}^2}} = \frac{1}{1,118 + \sqrt{1,118^2 - 1,043^2}} = 0,658$$

POSOUZENÍ PRVKU PRO VLHKOST 12,67 % $\Rightarrow f_{c,o,k} = 41,5 \text{ MPa}$

Vlhkost 12,67 % představuje běžnou vlhkost tohoto prvku během obvyklého užívání. Průměrná pevnost odpovídající této vlhkosti je 41,5 MPa.

$$f_{c,o,d} = k_c \times k_{mod} \times \frac{f_{c,o,k}}{\gamma_M} = 0,658 \times 0,65 \times \frac{41,5}{1,3} = 13,654 \text{ MPa}$$

Podmínka spolehlivosti:

$$\frac{\sigma_{c,o,d}}{f_{c,o,d}} = \frac{5,536}{13,654} = 0,405 \leq 1,0 \Rightarrow \text{VYHOVÍ}$$

POSOUZENÍ PRVKU PRO VLHKOST 82,95 % $\Rightarrow f_{c,o,k} = 19,42 \text{ MPa}$

Vlhkost 82,95 % odpovídá vlhkosti prvku ponořeného ve vodě po dobu 7 dní. Tento jev si můžeme představit jako sloup, který byl po dobu 7 dní zaplaven během povodní. Průměrná pevnost stanovena pro tuto vlhkost je 19,42 MPa.

$$f_{c,o,d} = k_c \times k_{mod} \times \frac{f_{c,o,k}}{\gamma_M} = 0,658 \times 0,65 \times \frac{19,42}{1,3} = 6,389 \text{ MPa}$$

Podmínka spolehlivosti:

$$\frac{\sigma_{c,o,d}}{f_{c,o,d}} = \frac{5,536}{6,389} = 0,866 \leq 1,0 \Rightarrow \text{VYHOVÍ}$$

Prvek byl řešen jako kloubově uložený prut. Při běžné vlhkosti, která v tomto případě byla uvažována jako 12,67 %, posudek na vzpěrný tlak vyhověl s rezervou 59,5 %. Při vlhkosti 82,95 %, odpovídající ponořenému prvku ve vodě po dobu 7 dní během povodní, tento prvek taky vyhověl. Rezerva už ale byla menší, a to 13,4 %.

6.8.1 Zahrnutí vlivu bobtnání do posouzení prvku

Vstupní údaje byly uvažovány pro prvek odpovídající referenční vlhkosti $\pm 12 \%$ vlhkosti vzduchu. Vstupní rozměry odpovídají tedy běžnému stavu, v našem případě s vlhkostí 12,67 %. Pro posouzení více nasyceného stavu, vliv bobtnání nebyl uvažován. Následující tabulka ukazuje, jak se jednotlivé rozměry změní vlivem bobtnání.

Tabulka 7: Změny rozměrů vlivem bobtnání

	a	b	l
bobtnání ($\omega = 12,67 \%$)	4,62 %	3,51 %	0,27 %
rozměry ($\omega = 12,67 \%$)	170 mm	170 mm	3000 mm
bobtnání ($\omega = 82,95 \%$)	8,27 %	8,16 %	0,26 %
rozměry ($\omega = 82,95 \%$)	176 mm	178 mm	3000 mm

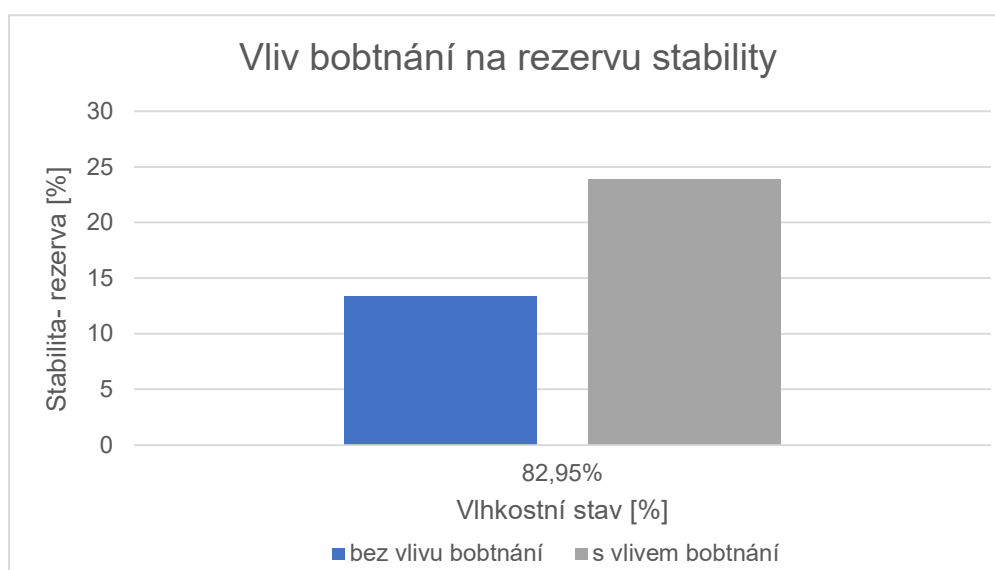
Tyto rozměry byly použity do statického výpočtu pro posouzení prvku v odpovídajících vlhkostních stavech. Výpočet byl proveden stejným způsobem (viz výše). Změnily se pouze rozměry.

POSOUZENÍ PRVKU PRO VLHKOST 82,95 % $\Rightarrow f_{c,o,k} = 19,42 \text{ MPa}$

Podmínka spolehlivosti pro rozměry odpovídající ($\omega = 82,95 \%$)

$$\frac{\sigma_{c,o,d}}{f_{c,o,d}} = \frac{5,112}{6,719} = 0,761 \leq 1,0 \Rightarrow \text{VYHOVÍ}$$

Následně byl vytvořen graf pro přehlednější srovnání statických výpočtů pro uvažovaný prvek.



Graf 6: Vliv bobtnání na rezervu stability posuzovaného prvku

Graf znázorňuje, že zahrnutím vlivu bobtnání do statického výpočtu prvku s větší vlhkostí, dojde ke zvětšení rezervy stability prvku.

V případě prvku uvažovaného při vlhkosti 82,95 % se rozměry změnily docela výrazným způsobem. To mělo vliv na nárůst rezervy stability, která se zvětšila až o 10,5 %. Rezerva tedy se celkově rovnala 23,9 %.

Celkově můžeme říct, že výpočet stability je uvažován pro běžný stav a u prvku s větší vlhkostí dojde k vytvoření přirozené rezervy. Jedná se o výpočet na stranu bezpečnou. V případě většího nasáknutí prvku vodou, než je referenční hodnota $\pm 12 \%$, dojde ke zvětšení rozměrů. Vlivem tohoto bobtnání, se vytvoří přirozená rezerva, která se podílí na větší stabilitě prvku.

6. ZÁVĚR

Bakalářská práce se zabývala vlivem změny vlhkosti na fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva. V této konkrétní práci se jednalo o smrkové dřevo. Práci bylo potvrzeno, že hustota roste společně s vlhkostí. Grafem byl znázorněn lineární růst této závislosti. Dále bylo prokázáno, že s narůstající vlhkostí dochází k rozměrovým změnám až do bodu nasycení buněčných stěn. Dále se potvrdilo, že radiální, tangenciální, příčné i objemové bobtnání výrazně roste až do bodu nasycení buněčných stěn, což odpovídá vlhkosti okolo 30 %. U vzorků, u kterých byla naměřená větší vlhkost, se bobtnání již nijak výrazně neměnilo. Charakter křivky je stejný, mění se pouze velikost bobtnání v různých směrech. Řádově nejmenších hodnot dosahuje bobtnání v podélném směru, následně v radiálním a tangenciálním směru. Největších hodnot dosahuje objemové bobtnání. Tato práce dále potvrdila, že pevnost v tlaku rovnoběžně s vlákny se snižuje až do bodu nasycení buněčných stěn a za touto hranicí se hodnoty pevnosti výrazným způsobem nemění. Největší pevnosti dosahovaly vysušené vzorky a to 87,12 MPa a nejmenší vyhodnoceny hodnoty se pohybovaly kolem 20 MPa. Následně byla potvrzená závislost pevnosti v tahu za ohybu na vlhkosti. Ta byla měřena jak pro tangenciální, tak pro radiální směr. Obě křivky měly podobný průběh. Největší pevnosti dosahovaly vysušené vzorky a to kolem 120 MPa. Poté pevnosti výrazně klesaly, až do bodu nasycení buněčných stěn. Od tohoto bodu se pevnosti pro oba směry pohybovaly konstantně kolem hodnoty 40 MPa. Vyšších hodnot by měla dosahovat pevnost v tangenciálním směru. Tato práce zmiňovanou skutečnost výrazně nedokázala, což bylo způsobeno menším počtem zkušebních těles.

7. SEZNAMY

7.1 Seznam použité literatury a zdrojů

- [1] ADÁMEK, Jiří, Jan KOUKAL a Bohumil NOVOTNÝ. *Stavební materiály*. Brno: CERM, 1997. Učební texty vysokých škol. ISBN 80-214-0631-3.
- [2] SVOBODA, L. *Stavební hmoty*. 4. vyd. Praha: Luboš Svoboda Dům "U staré podkovy", 2018.
- [3] *Lesnická xylologie: Makroskopická stavba dřeva. Přednáška* [online]. [cit. 2020-04-26]. Dostupné z:
https://akela.mendelu.cz/~xcepl/inobio/inovace/Lesnicka_xylologie/LEX-pr01-makroskopicka_stavba_dreva.pdf
- [4] HEŘMÁNKOVÁ, Věra. *AI01 Stavební látky a geologie: Dřevo a dřevěné výrobky*. Brno: VUT Brno, FAST, Ústav stavebního zkušebnictví. Přednáška.
- [5] BALAS, Ondřej. *Diagnostické metody pro hodnocení stavu dřevěné konstrukce* [online]. Brno, 2013 [cit. 2020-04-20]. Dostupné z:
https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=76402.
Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Věra Heřmánková, Ph.D.
- [6] Škůdci. Skudci.com [online]. [cit. 2020-03-20]. Dostupné z:
<https://www.skudci.com/na-cem-skodi>
- [7] Biotičtí škůdci dřeva. [Http://drevari.humlak.cz](http://drevari.humlak.cz) [online]. [cit. 2020-03-16].
Dostupné z: http://drevari.humlak.cz/data_web/Data_skola/HUdreva/3.pdf
- [8] Dřevomorka domácí. Skudci.com [online]. [cit. 2020-04-26]. Dostupné z:
<https://www.skudci.com/drevomorka-domaci>
- [9] Koniofora sklepní. Skudci.com [online]. [cit. 2020-04-26]. Dostupné z:
<https://www.skudci.com/koniofora-sklepni>

- [10] *Trámovka plotní. Skudci.com [online]. [cit. 2020-04-26]. Dostupné z:*
<https://www.skudci.com/tramovka-plotni>
- [11] *Parnatka Vaillantova. Skudci.com [online]. [cit. 2020-04-26]. Dostupné z:*
<https://www.skudci.com/pornatka-vaillantova>
- [12] *Pilořitka velká. Skudci.com [online]. [cit. 2020-04-26]. Dostupné z:*
<https://www.skudci.com/piloritka-velka>
- [13] *Hrbohlav parketový. Skudci.com [online]. [cit. 2020-04-26]. Dostupné z:*
<https://www.skudci.com/hrbohlav-parketovy>
- [14] *Červotoč proužkovaný. Skudci.com [online]. [cit. 2020-04-26]. Dostupné z:*
<https://www.skudci.com/cervotoc-prouzkovany>
- [15] *Červotoč umrlčí. Skudci.com [online]. [cit. 2020-04-26]. Dostupné z:*
<https://www.skudci.com/cervotoc-umrlci>
- [16] *Tesařík krovový. Skudci.com [online]. [cit. 2020-04-26]. Dostupné z:*
<https://www.skudci.com/tesarik-krovovy>
- [17] KLOIBER, Michal. *Nedestruktivní zjišťování vlastností dřeva [online].* Brno, 2007 [cit. 2020-03-17]. Dostupné z:
[file:///C:/Users/admin/Downloads/zaverecna_prace%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/admin/Downloads/zaverecna_prace%20(1).pdf). Disertační práce.
Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně.
- [18] *Dřevo, fyzikální a mechanické vlastnosti, vady dřeva, vlhkost a sušení dřeva [online]. [cit. 2020-03-20]. Dostupné z:* <https://docplayer.cz/5395231-1-drevo-fyzikalni-a-mechanicke-vlastnosti-vady-dreva-vlhkost-a-suseni-dreva.html>
- [19] *Konstrukční ochrana dřevěných prvků. Https://stavba.tzb-info.cz [online]. [cit. 2020-04-31]. Dostupné z:* <https://stavba.tzb-info.cz/drevene-konstrukce/11686-konstrukcni-ochrana-drevenych-prvku>
- [20] VYMAZAL, Tomáš. *Stavební látky - cvičebnice.* 2. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2011. ISBN 978-80-7204-720-8.

- [21] Závislost fyzikálních a *mechanických vlastností konstrukčního smrkového dřeva* na vlhkosti [online]. [cit. 2020-04-21]. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/drevene-konstrukce/16872-zavislost-fyzikalnich-a-mechanickych-vlastnosti-konstrukcniho-smrkoveho-dreva-na-vlhkosti>
- [22] ČSN EN 13183-1: *Vlhkost vzorku řeziva - Část 1: Stanovení váhovou metodou*. Praha: ÚNMZ, 2002.
- [23] ČSN 49 0108: *Drevo. Zisťovanie hustoty*. Praha: Český normalizační institut, 1993.
- [24] ČSN 49 0126: *Skúšky vlastností rastlého dreva. Metóda zisťovania napúčavosti*. Praha: Český normalizační institut, 1992.
- [25] ČSN EN 408: *Dřevěné konstrukce - Konstrukční dřevo a lepené lamelové dřevo - Stanovení některých fyzikálních a mechanických vlastností*. Praha: ÚNMZ, 2012.
- [26] Stavba dřeva: *Nauka o materiálech* [online]. [cit. 2020-04-21]. Dostupné z: <http://evawolna.sweb.cz/prvak-mat3.php>
- [27] Poruchy dřevěných podlah. <https://www.artparket.cz> [online]. [cit. 2020-04-31]. Dostupné z: https://www.artparket.cz/documents/poruchy_df8evecnfdch_podlah_.html

7.2 Seznam obrázků

<i>Obrázek 1: Základní řezy dřevem (příčný (P), radiální (R), tangenciální (T))</i> [26]	14
<i>Obrázek 2: Řez kmenem a jeho stavba</i> [3]	15
<i>Obrázek 3: Letokruh</i> [3]	16
<i>Obrázek 4: Dřevomorka domácí</i> [8]	20
<i>Obrázek 5: Trámovka plotní</i> [10]	21
<i>Obrázek 6: Červotoč umrlčí</i> [15]	22
<i>Obrázek 7: Tesařík krovový</i> [16]	23
<i>Obrázek 8: Základní anatomické směry v dřevině</i> [5]	25

<i>Obrázek 9: Vysychání buněk dřeva [13]</i>	27
<i>Obrázek 10: Příčné borcení (nalevo), podélné borcení (napravo) [14]</i>	28
<i>Obrázek 11: Fotodokumentace zkušebních vzorků</i>	34
<i>Obrázek 12: Rozměry zkušebního vzorku</i>	35
<i>Obrázek 13: Fotodokumentace vlhčení zkušebních vzorků</i>	35
<i>Obrázek 14: Fotodokumentace a schéma zkoušky pevnosti v tlaku</i>	42
<i>Obrázek 15: Fotodokumentace a schéma zkoušky pevnosti v tahu za ohybu</i>	45
<i>Obrázek 16: Statické schéma a průřez posuzovaného prvku</i>	48

7.3 Seznam tabulek

<i>Tabulka 1: Rozdělení dřevin podle objemové hmotnosti [2]</i>	26
<i>Tabulka 2: Vypočtené hodnoty vlhkosti jednotlivých vzorků</i>	36
<i>Tabulka 3: Vypočítané hodnoty hustoty pro jednotlivé vzorky</i>	37
<i>Tabulka 4: Průměrné hodnoty bobtnání v různých směrech pro jednotlivé sady</i>	40
<i>Tabulka 5: Vypočítané hodnoty pevnosti v tlaku pro jednotlivé vzorky</i>	43
<i>Tabulka 6: Vypočítané hodnoty pevnosti v tahu za ohybu pro jednotlivé vzorky</i>	46
<i>Tabulka 7: Změny rozměrů vlivem bobtnání</i>	50

7.4 Seznam grafů

<i>Graf 1: Závislost vlhkostí dřeva na relativní vlhkosti vzduchu [12]</i>	26
<i>Graf 2: Závislosti hustoty dřeva na vlhkosti</i>	38
<i>Graf 3: Závislost bobtnání na vlhkosti</i>	41
<i>Graf 4: Vliv vlhkosti na pevnosti v tlaku</i>	44
<i>Graf 5: Vliv vlhkosti na pevnost v tahu za ohybu</i>	47
<i>Graf 6: Vliv bobtnání na rezervu stability posuzovaného prvku</i>	51

7.5 Seznam příloh

<i>Příloha 1: Tabulka naměřených hodnot vzorků ve vysušeném stavu</i>	<i>I</i>
<i>Příloha 2: Tabulka naměřených hodnot vzorků ve vlhkém stavu</i>	<i>V</i>
<i>Příloha 3: Tabulka vypočítaných pevností v tlaku pro jednotlivé vzorky.....</i>	<i>VIII</i>
<i>Příloha 4: Tabulka vypočítaných pevností v tahu za ohybu pro jednotlivé vzorky</i>	<i>IX</i>
<i>Příloha 5: Tabulka vypočítaných hodnot bobtnání pro jednotlivé vzorky.....</i>	<i>X</i>
<i>Příloha 6: Tabulka vypočítaných hodnot hustoty pro jednotlivé vzorky</i>	<i>XII</i>

Príloha 1: Tabuľka naměřených hodnot vzorků ve vysušeném stavu

sada vzorků A									
vysušený stav ($\omega = 0 \%$)									
číslo vz.	m [g]	l [mm]	a ₁ [mm]	a ₂ [mm]	a [mm]	b ₁ [mm]	b ₂ [mm]	b [mm]	V [cm ³]
AI	46,47	148,96	24,35	24,33	24,34	24,70	24,78	24,74	89,70
AII	48,70	150,55	24,35	24,45	24,40	24,54	24,49	24,52	90,05
AIII	47,19	150,74	24,86	24,51	24,69	24,49	24,89	24,69	91,87
AIV	52,75	151,23	24,73	24,71	24,72	24,29	24,36	24,33	90,94
AV	35,56	150,64	24,50	24,45	24,48	24,49	24,73	24,61	90,73
AVI	35,69	150,89	24,55	24,62	24,59	24,43	24,56	24,50	90,87
průměr	44,39	150,50	24,56	24,51	24,53	24,49	24,64	24,56	90,69
A1	165,34	476,88	24,32	24,27	24,30	24,57	24,67	24,62	285,24
A2	152,42	474,49	24,29	24,26	24,28	24,48	24,55	24,52	282,37
A3	140,33	475,37	24,46	24,55	24,51	24,77	24,72	24,75	288,25
A4	146,92	474,62	24,67	24,56	24,62	25,03	24,90	24,97	291,66
A5	123,93	474,32	24,51	24,52	24,52	24,86	24,79	24,83	288,66
A6	146,74	475,10	24,46	24,37	24,42	24,79	24,89	24,84	288,13
průměr	145,95	475,13	24,45	24,42	24,44	24,75	24,75	24,75	287,39

sada vzorků B									
vysušený stav ($\omega = 0 \%$)									
číslo vz.	m [g]	l [mm]	a ₁ [mm]	a ₂ [mm]	a [mm]	b ₁ [mm]	b ₂ [mm]	b [mm]	V [cm ³]
BI	47,31	150,09	24,31	24,21	24,26	24,35	24,38	24,37	88,72
BII	48,68	150,85	24,31	24,57	24,44	24,39	24,46	24,43	90,05
BIII	51,44	149,98	24,36	24,53	24,45	24,16	24,57	24,37	89,33
BIV	52,41	150,19	24,27	24,31	24,29	24,17	24,13	24,15	88,10
BV	35,41	150,39	24,34	24,55	24,45	24,30	24,49	24,40	89,68
BVI	35,26	149,65	24,51	24,58	24,55	24,26	24,36	24,31	89,29
průměr	45,09	150,19	24,35	24,46	24,40	24,27	24,40	24,34	89,20
B1	162,74	476,20	23,91	23,99	23,95	24,47	24,42	24,45	278,79
B2	133,79	474,98	24,12	24,05	24,09	24,46	24,37	24,42	279,30
B3	148,47	475,47	24,47	24,48	24,48	24,69	24,67	24,68	287,20
B4	121,38	474,37	24,48	24,46	24,47	24,73	24,78	24,76	287,35
B5	144,28	475,50	24,07	24,05	24,06	24,31	24,42	24,37	278,75
B6	134,92	474,81	24,26	24,32	24,29	24,63	24,59	24,61	283,83
průměr	140,93	475,22	24,22	24,23	24,22	24,55	24,54	24,55	282,54

Příloha 1: Tabulka naměřených hodnot vzorků ve vysušeném stavu

sada vzorků C									
vysušený stav ($\omega = 0 \%$)									
číslo vz.	m [g]	l [mm]	a ₁ [mm]	a ₂ [mm]	a [mm]	b ₁ [mm]	b ₂ [mm]	b [mm]	V [cm ³]
CI	43,75	149,60	24,25	24,24	24,25	24,68	24,72	24,70	89,59
CII	48,30	150,78	24,38	24,45	24,42	24,43	24,37	24,40	89,82
CIII	52,16	150,26	24,45	24,32	24,39	24,12	24,04	24,08	88,23
CIV	52,03	150,26	24,26	24,25	24,26	24,11	24,26	24,19	88,14
CV	36,17	150,24	24,47	24,31	24,39	24,38	24,33	24,36	89,25
CVI	35,02	149,82	24,65	24,56	24,61	24,46	24,53	24,50	90,30
průměr	44,57	150,16	24,41	24,36	24,38	24,36	24,38	24,37	89,22
C1	163,13	476,16	24,03	23,92	23,98	24,37	24,48	24,43	278,83
C2	134,08	474,82	23,98	24,20	24,09	24,45	24,38	24,42	279,27
C3	137,95	473,99	24,03	24,19	24,11	24,77	24,55	24,66	281,81
C4	141,02	475,10	24,80	24,50	24,65	24,65	24,72	24,69	289,09
C5	122,58	474,90	24,49	24,38	24,44	24,71	24,74	24,73	286,91
C6	143,26	474,26	24,52	24,10	24,31	24,64	24,57	24,61	283,68
průměr	140,34	474,87	24,31	24,22	24,26	24,60	24,57	24,59	283,27

sada vzorků D									
vysušený stav ($\omega = 0 \%$)									
číslo vz.	m [g]	l [mm]	a ₁ [mm]	a ₂ [mm]	a [mm]	b ₁ [mm]	b ₂ [mm]	b [mm]	V [cm ³]
DI	46,42	149,10	24,35	24,34	24,35	24,67	24,79	24,73	89,77
DII	48,92	150,41	24,30	24,25	24,28	24,47	24,34	24,41	89,11
DIII	51,39	148,81	24,30	24,11	24,21	24,26	24,25	24,26	87,37
DIV	52,62	150,40	24,50	24,54	24,52	24,22	24,26	24,24	89,39
DV	36,27	150,24	24,38	24,46	24,42	24,28	24,23	24,26	88,99
DVI	36,20	149,89	24,24	24,27	24,26	24,55	24,59	24,57	89,33
průměr	45,30	149,81	24,35	24,33	24,34	24,41	24,41	24,41	88,99
D1	157,81	476,61	23,91	24,00	23,96	24,39	24,38	24,39	278,41
D2	131,85	474,98	24,30	24,17	24,24	24,47	24,36	24,42	281,04
D3	146,56	474,87	24,18	24,08	24,13	24,49	24,61	24,55	281,31
D4	145,40	474,75	24,18	24,24	24,21	24,68	24,59	24,64	283,15
D5	148,71	475,55	24,66	24,52	24,59	24,71	24,71	24,71	288,95
D6	123,61	474,53	24,49	24,45	24,47	24,84	24,68	24,76	287,51
průměr	142,32	475,22	24,29	24,24	24,27	24,60	24,56	24,58	283,39

Příloha 1: Tabulka naměřených hodnot vzorků ve vysušeném stavu

sada vzorků E									
vysušený stav ($\omega = 0 \%$)									
číslo vz.	m [g]	l [mm]	a ₁ [mm]	a ₂ [mm]	a [mm]	b ₁ [mm]	b ₂ [mm]	b [mm]	V [cm ³]
EI	47,45	150,55	24,28	24,47	24,38	24,39	24,56	24,48	89,81
EII	47,01	150,34	24,34	24,36	24,35	24,68	24,68	24,68	90,35
EIII	52,58	150,10	24,26	24,22	24,24	24,24	24,27	24,26	88,25
EIV	51,51	150,73	24,47	24,24	24,36	24,29	24,20	24,25	89,00
EV	35,73	150,51	24,64	24,81	24,73	24,39	24,25	24,32	90,50
EVI	36,34	150,37	24,49	24,67	24,58	24,59	24,86	24,73	91,39
průměr	45,10	150,43	24,41	24,46	24,44	24,43	24,47	24,45	89,88
E1	159,08	473,48	23,68	24,10	23,89	24,34	24,29	24,32	275,04
E2	132,34	475,36	24,02	24,03	24,03	24,42	24,47	24,45	279,17
E3	146,67	474,95	24,11	24,12	24,12	24,52	24,54	24,53	280,95
E4	144,28	474,07	24,29	24,18	24,24	24,76	24,63	24,70	283,72
E5	145,18	474,64	24,51	24,42	24,47	24,75	24,92	24,84	288,39
E6	140,90	474,37	24,09	24,10	24,10	24,39	24,35	24,37	278,55
průměr	144,74	474,48	24,12	24,16	24,14	24,53	24,53	24,53	280,97

sada vzorků F									
vysušený stav ($\omega = 0 \%$)									
číslo vz.	m [g]	l [mm]	a ₁ [mm]	a ₂ [mm]	a [mm]	b ₁ [mm]	b ₂ [mm]	b [mm]	V [cm ³]
FI	48,19	150,75	24,24	24,61	24,43	24,49	24,47	24,48	90,14
FII	46,44	150,54	24,45	24,55	24,50	24,52	24,48	24,50	90,36
FIII	52,22	150,16	24,29	24,26	24,28	24,44	24,28	24,36	88,80
FIV	52,75	150,10	24,30	24,76	24,53	24,49	24,61	24,55	90,39
FV	35,52	150,67	24,52	24,37	24,45	24,42	24,41	24,42	89,92
FVI	36,40	150,70	24,51	24,38	24,45	24,52	24,68	24,60	90,62
průměr	45,25	150,49	24,39	24,49	24,44	24,48	24,49	24,48	90,04
F1	154,73	475,83	23,34	23,03	23,19	24,45	24,29	24,37	268,85
F2	139,10	473,79	24,35	24,30	24,33	24,72	24,64	24,68	284,44
F3	149,94	474,74	24,23	24,02	24,13	24,77	24,49	24,63	282,09
F4	141,20	475,02	24,30	24,22	24,26	24,66	24,69	24,68	284,35
F5	146,39	474,70	24,36	24,35	24,36	24,77	24,73	24,75	286,14
F6	143,11	474,65	24,03	24,05	24,04	24,39	24,40	24,40	278,36
průměr	145,75	474,79	24,10	24,00	24,05	24,63	24,54	24,58	280,71

Příloha 1: Tabulka naměřených hodnot vzorků ve vysušeném stavu

sada vzorků G									
vysušený stav ($\omega = 0 \%$)									
číslo vz.	m [g]	l [mm]	a ₁ [mm]	a ₂ [mm]	a [mm]	b ₁ [mm]	b ₂ [mm]	b [mm]	V [cm ³]
GI	47,88	149,42	24,52	24,31	24,42	24,37	24,43	24,40	89,01
GII	46,47	150,38	24,61	24,53	24,57	24,63	24,39	24,51	90,56
GIII	52,99	150,69	24,46	24,37	24,42	24,26	24,04	24,15	88,85
GIV	36,11	150,59	24,55	24,42	24,49	24,46	24,50	24,48	90,26
GV	36,44	150,93	24,45	24,45	24,45	24,35	24,28	24,32	89,73
GVI	36,67	150,53	24,27	24,33	24,30	24,51	24,49	24,50	89,62
průměr	42,76	150,42	24,48	24,40	24,44	24,43	24,36	24,39	89,67
G1	151,14	474,85	24,06	23,15	23,61	24,42	24,39	24,41	273,55
G2	140,41	473,83	24,30	24,30	24,30	24,70	24,66	24,68	284,17
G3	147,43	474,86	24,65	24,52	24,59	24,74	24,80	24,77	289,18
G4	143,00	474,59	24,32	24,20	24,26	24,58	24,74	24,66	283,92
G5	147,58	474,28	24,20	24,36	24,28	24,61	24,57	24,59	283,17
G6	140,24	474,62	24,27	24,04	24,16	24,50	24,40	24,45	280,31
průměr	144,97	474,51	24,30	24,10	24,20	24,59	24,59	24,59	282,38

Příloha 2: Tabulka naměřených hodnot vzorků ve vlhkém stavu

sada vzorků B									
vlhký stav ($\omega > 0 \%$)									
číslo vz.	m [g]	l [mm]	a ₁ [mm]	a ₂ [mm]	a [mm]	b ₁ [mm]	b ₂ [mm]	b [mm]	V [cm ³]
BI	53,13	150,81	25,18	25,34	25,26	25,47	25,89	25,68	97,83
BII	54,34	151,21	25,34	25,00	25,17	25,47	25,34	25,41	96,69
BIII	56,67	150,09	25,24	25,00	25,12	25,19	25,21	25,20	95,01
BIV	58,20	150,86	25,22	25,07	25,15	25,44	25,18	25,31	96,01
BV	40,76	150,65	25,56	25,23	25,40	25,46	25,45	25,46	97,38
BVI	40,82	149,97	25,56	25,37	25,47	25,82	25,57	25,70	98,13
průměr	50,65	150,60	25,35	25,17	25,26	25,48	25,44	25,46	96,84
B1	173,65	476,47	24,85	24,55	24,70	24,77	24,78	24,78	291,57
B2	142,85	475,46	24,77	24,75	24,76	24,85	24,83	24,84	292,43
B3	155,97	476,23	24,89	25,05	24,97	24,94	25,06	25,00	297,29
B4	127,87	475,28	24,95	25,20	25,08	25,07	25,08	25,08	298,83
B5	167,27	476,38	25,49	25,31	25,40	25,28	25,37	25,33	306,43
B6	142,04	475,51	24,72	24,83	24,78	25,01	25,04	25,03	294,81
průměr	151,61	475,89	24,95	24,95	24,95	24,99	25,03	25,01	296,89

sada vzorků C									
vlhký stav ($\omega > 0 \%$)									
číslo vz.	m [g]	l [mm]	a ₁ [mm]	a ₂ [mm]	a [mm]	b ₁ [mm]	b ₂ [mm]	b [mm]	V [cm ³]
CI	52,70	150,40	25,73	25,83	25,78	25,61	25,62	25,62	99,32
CII	57,71	151,58	25,81	25,91	25,86	25,82	25,76	25,79	101,09
CIII	61,84	150,95	25,51	25,60	25,56	25,83	25,86	25,85	99,70
CIV	61,69	151,02	25,53	25,58	25,56	26,03	25,76	25,90	99,94
CV	44,22	150,80	25,83	25,74	25,79	25,76	25,80	25,78	100,24
CVI	42,61	150,89	25,94	25,79	25,87	25,88	25,93	25,91	101,10
průměr	53,46	150,94	25,73	25,74	25,73	25,82	25,79	25,81	100,23
C1	187,14	476,62	25,41	25,47	25,44	25,51	25,13	25,32	307,01
C2	158,25	476,17	25,61	25,62	25,62	25,45	25,54	25,50	310,96
C3	157,51	475,59	25,38	25,54	25,46	25,36	25,28	25,32	306,59
C4	173,45	477,20	25,75	25,65	25,70	25,54	25,40	25,47	312,37
C5	145,48	476,23	25,83	25,79	25,81	25,58	25,78	25,68	315,65
C6	173,57	475,26	26,02	26,18	26,10	25,66	25,73	25,70	318,73
průměr	165,90	476,18	25,67	25,71	25,69	25,52	25,48	25,50	311,88

Příloha 2: Tabulka naměřených hodnot vzorků ve vlhkém stavu

sada vzorků D									
vlhký stav ($\omega > 0 \%$)									
číslo vz.	m [g]	l [mm]	a ₁ [mm]	a ₂ [mm]	a [mm]	b ₁ [mm]	b ₂ [mm]	b [mm]	V [cm ³]
DI	62,27	149,61	25,56	25,55	25,56	25,80	26,14	25,97	99,29
DII	62,58	151,14	26,01	26,31	26,16	26,42	26,20	26,31	104,03
DIII	64,84	149,38	25,95	25,84	25,90	26,05	26,15	26,10	100,96
DIV	66,19	151,15	25,60	25,88	25,74	26,24	26,14	26,19	101,89
DV	47,28	151,25	26,00	26,12	26,06	25,99	25,89	25,94	102,24
DVI	45,45	150,45	25,76	25,80	25,78	26,03	26,07	26,05	101,04
průměr	58,10	150,50	25,81	25,92	25,87	26,09	26,10	26,09	101,58
D1	197,58	477,53	26,06	25,86	25,96	25,52	25,24	25,38	314,63
D2	174,91	475,93	26,49	26,46	26,48	25,47	25,54	25,51	321,37
D3	185,79	476,04	26,42	26,38	26,40	26,02	25,81	25,92	325,69
D4	184,93	475,60	26,46	26,62	26,54	26,08	26,86	26,47	334,12
D5	187,01	477,02	26,26	26,33	26,30	25,62	25,57	25,60	321,04
D6	158,11	475,55	26,45	26,37	26,41	25,68	25,69	25,69	322,58
průměr	181,39	476,28	26,36	26,34	26,35	25,73	25,79	25,76	323,24

sada vzorků E									
vlhký stav ($\omega > 0 \%$)									
číslo vz.	m [g]	l [mm]	a ₁ [mm]	a ₂ [mm]	a [mm]	b ₁ [mm]	b ₂ [mm]	b [mm]	V [cm ³]
EI	62,82	150,89	26,26	26,19	26,23	26,46	26,17	26,32	104,13
EII	62,71	151,04	26,37	26,52	26,45	26,57	26,40	26,49	105,79
EIII	70,37	151,09	26,67	26,16	26,42	26,26	26,31	26,29	104,90
EIV	68,95	151,04	25,87	25,93	25,90	26,35	26,38	26,37	103,14
EV	53,07	151,11	26,01	25,96	25,99	26,22	26,23	26,23	102,97
EVI	45,98	150,73	25,77	25,92	25,85	25,89	25,98	25,94	101,03
průměr	60,65	150,98	26,16	26,11	26,14	26,29	26,25	26,27	103,66
E1	218,52	474,28	26,34	26,38	26,36	25,84	25,80	25,82	322,80
E2	198,36	476,17	26,34	26,38	26,36	25,63	25,83	25,73	322,96
E3	222,66	476,09	26,49	26,66	26,58	25,90	25,97	25,94	328,13
E4	198,88	475,22	26,59	26,74	26,67	25,89	25,81	25,85	327,56
E5	200,90	475,68	26,61	26,58	26,60	25,92	25,76	25,84	326,89
E6	206,78	475,36	26,15	26,20	26,18	25,80	25,86	25,83	321,39
průměr	207,68	475,47	26,42	26,49	26,46	25,83	25,84	25,83	324,96

Příloha 2: Tabulka naměřených hodnot vzorků ve vlhkém stavu

sada vzorků F									
vlhký stav ($\omega > 0 \%$)									
číslo vz.	m [g]	l [mm]	a ₁ [mm]	a ₂ [mm]	a [mm]	b ₁ [mm]	b ₂ [mm]	b [mm]	V [cm ³]
FI	71,60	151,03	26,36	26,46	26,41	26,48	26,53	26,51	105,72
FII	67,35	151,20	26,36	26,67	26,52	26,08	26,18	26,13	104,76
FIII	77,10	150,52	26,21	26,17	26,19	26,33	26,38	26,36	103,89
FIV	75,73	151,03	26,18	26,06	26,12	26,76	26,42	26,59	104,89
FV	58,26	151,32	26,22	26,31	26,27	26,19	26,09	26,14	103,89
FVI	52,37	150,82	26,04	26,01	26,03	26,29	26,15	26,22	102,92
průměr	67,07	150,99	26,23	26,28	26,25	26,36	26,29	26,32	104,35
F1	258,48	476,66	25,54	25,96	25,75	25,80	25,77	25,79	316,48
F2	223,69	475,51	26,15	26,15	26,15	25,54	25,56	25,55	317,70
F3	251,42	475,77	26,95	26,67	26,81	25,83	25,91	25,87	329,98
F4	229,54	476,05	26,71	26,63	26,67	25,79	25,72	25,76	326,99
F5	267,84	475,72	26,62	26,77	26,70	25,92	25,85	25,89	328,72
F6	234,48	475,64	26,41	26,53	26,47	26,06	25,84	25,95	326,72
průměr	244,24	475,89	26,40	26,45	26,42	25,82	25,78	25,80	324,43

vzorek G									
vlhký stav ($\omega > 0 \%$)									
číslo vz.	m [g]	l [mm]	a ₁ [mm]	a ₂ [mm]	a [mm]	b ₁ [mm]	b ₂ [mm]	b [mm]	V [cm ³]
GI	84,86	150,10	26,57	26,77	26,67	26,60	26,46	26,53	106,20
GII	78,84	150,56	26,61	26,59	26,60	26,38	26,14	26,26	105,17
GIII	90,57	151,00	26,16	26,27	26,22	26,81	26,50	26,66	105,51
GIV	70,91	151,16	26,39	26,40	26,40	26,35	26,40	26,38	105,23
GV	75,43	151,14	26,84	26,48	26,66	26,21	26,23	26,22	105,65
GVI	64,73	150,90	26,09	26,03	26,06	26,39	26,44	26,42	103,88
průměr	77,56	150,81	26,44	26,42	26,43	26,46	26,36	26,41	105,27
G1	280,92	475,81	26,19	25,68	25,94	25,74	25,74	25,74	317,64
G2	269,00	475,55	26,32	26,25	26,29	25,67	25,70	25,69	321,06
G3	275,01	476,42	26,46	26,67	26,57	25,67	25,77	25,72	325,51
G4	276,66	476,05	26,82	26,82	26,82	25,77	25,76	25,77	328,96
G5	344,10	475,55	26,69	26,83	26,76	26,04	26,00	26,02	331,12
G6	254,75	475,54	26,39	26,42	26,41	25,77	25,76	25,77	323,52
průměr	283,41	475,82	26,48	26,45	26,46	25,78	25,79	25,78	324,64

Příloha 3: Tabulka vypočítaných pevností v tlaku pro jednotlivé vzorky

Pevnost $f_{c,0}$									
sada vzorků: A ($\omega=0\%$)					sada vzorků: B ($\omega=12,67\%$)				
č.vz.	ω [%]	F_{max} [kN]	A [mm ²]	$f_{c,0}$ [MPa]	č.vz.	ω [%]	F_{max} [kN]	A [mm ²]	$f_{c,0}$ [MPa]
AI	0,00	54,00	602,17	89,68	BI	12,30	31,00	648,68	47,79
AII	0,00	61,50	598,17	102,81	BII	11,63	26,00	639,44	40,66
AIII	0,00	59,00	609,47	96,81	BIII	10,17	27,50	633,02	43,44
AIV	0,00	57,50	601,31	95,62	BIV	11,05	32,50	636,42	51,07
AV	0,00	43,00	602,33	71,39	BV	15,11	16,50	646,43	25,52
AVI	0,00	40,00	602,21	66,42	BVI	15,77	26,50	654,32	40,50
průměr	0,00	52,50	602,61	87,12	průměr	12,67	26,67	643,05	41,50
sada vzorků: C ($\omega=20,17\%$)					sada vzorků: D ($\omega=28,32\%$)				
č.vz.	ω [%]	F_{max} [kN]	A [mm ²]	$f_{c,0}$ [MPa]	č.vz.	ω [%]	F_{max} [kN]	A [mm ²]	$f_{c,0}$ [MPa]
CI	20,46	17,50	660,35	26,50	DI	34,14	20,00	663,66	30,14
CII	19,48	23,50	666,93	35,24	DII	27,92	15,50	688,27	22,52
CIII	18,56	23,00	660,47	34,82	DIII	26,17	17,50	675,86	25,89
CIV	18,57	22,50	661,75	34,00	DIV	25,79	17,00	674,13	25,22
CV	22,26	15,50	664,74	23,32	DV	30,36	10,00	676,00	14,79
CVI	21,67	14,50	670,03	21,64	DVI	25,55	11,50	671,57	17,12
průměr	20,17	19,42	664,05	29,25	průměr	28,32	15,25	674,92	22,61
sada vzorků: E ($\omega=34,76\%$)					sada vzorků: F ($\omega=48,78\%$)				
č.vz.	ω [%]	F_{max} [kN]	A [mm ²]	$f_{c,0}$ [MPa]	č.vz.	ω [%]	F_{max} [kN]	A [mm ²]	$f_{c,0}$ [MPa]
EI	32,39	14,50	690,11	21,01	FI	48,58	16,00	700,00	22,86
EII	33,40	16,00	700,40	22,84	FII	45,03	16,10	692,84	23,24
EIII	33,83	17,50	694,32	25,20	FIII	47,64	17,20	690,24	24,92
EIV	33,86	17,50	682,85	25,63	FIV	43,56	18,00	694,53	25,92
EV	48,53	11,50	681,46	16,88	FV	64,02	9,80	686,57	14,27
EVI	26,53	14,00	670,29	20,89	FVI	43,87	11,60	682,38	17,00
průměr	34,76	15,17	686,57	22,08	průměr	48,78	14,78	691,09	21,37
sada vzorků: G ($\omega=82,95\%$)									
č.vz.	ω [%]	F_{max} [kN]	A [mm ²]	$f_{c,0}$ [MPa]					
GI	77,23	16,10	707,56	22,75					
GII	69,66	16,20	698,52	23,19					
GIII	70,92	16,00	698,76	22,90					
GIV	96,37	10,70	696,17	15,37					
GV	107,00	10,40	699,03	14,88					
GVI	76,52	12,00	688,37	17,43					
průměr	82,95	13,57	698,07	19,42					

Příloha 4: Tabulka vypočítaných pevností v tahu za ohybu pro jednotlivé vzorky

Pevnost f_m									
sada vzorků: A ($\omega=0\%$)					sada vzorků: B ($\omega=7,51\%$)				
č.vz.	ω [%]	F_{max} [kN]	$l/b \cdot h^2$ [mm ²]	f_m [MPa]	č.vz.	ω [%]	F_{max} [kN]	$l/b \cdot h^2$ [mm ²]	f_m [MPa]
A1	0,00	4,40	0,0328	144,39	B1	6,70	3,95	0,0315	124,45
A2	0,00	3,75	0,0328	123,17	B2	6,77	3,10	0,0312	96,69
A3	0,00	3,00	0,0320	95,97	B3	5,05	3,85	0,0305	117,44
A4	0,00	3,25	0,0309	100,55	B4	5,35	2,60	0,0301	78,23
A5	0,00	3,60	0,0314	113,02	B5	15,93	2,10	0,0292	61,30
A6	0,00	4,25	0,0315	134,03	B6	5,28	3,65	0,0306	111,70
průměr	0,00	3,71	0,0319	118,52	průměr	7,51	3,21	0,0305	98,30
sada vzorků: C ($\omega=18,30\%$)					sada vzorků: D ($\omega=27,58\%$)				
č.vz.	ω [%]	F_{max} [kN]	$l/b \cdot h^2$ [mm ²]	f_m [MPa]	č.vz.	ω [%]	F_{max} [kN]	$l/b \cdot h^2$ [mm ²]	f_m [MPa]
C1	14,72	2,90	0,0291	84,27	D1	25,20	2,45	0,0279	68,27
C2	18,03	2,10	0,0284	59,61	D2	32,66	1,30	0,0266	34,54
C3	14,18	1,95	0,0289	56,31	D3	26,77	1,60	0,0263	42,07
C4	23,00	1,90	0,0285	54,14	D4	27,19	1,90	0,0255	48,51
C5	18,68	2,15	0,0279	59,99	D5	25,75	2,05	0,0276	56,59
C6	21,16	2,15	0,0275	59,17	D6	27,91	1,60	0,0272	43,58
průměr	18,30	2,19	0,0284	62,25	průměr	27,58	1,82	0,0269	48,93
sada vzorků: E ($\omega=43,67\%$)					sada vzorků: F ($\omega=67,49\%$)				
č.vz.	ω [%]	F_{max} [kN]	$l/b \cdot h^2$ [mm ²]	f_m [MPa]	č.vz.	ω [%]	F_{max} [kN]	$l/b \cdot h^2$ [mm ²]	f_m [MPa]
E1	37,36	1,95	0,0264	51,46	F1	67,05	1,65	0,0278	45,92
E2	49,89	1,40	0,0266	37,22	F2	60,81	1,40	0,0271	37,98
E3	51,81	1,55	0,0259	40,19	F3	67,68	1,35	0,0255	34,47
E4	37,84	1,75	0,0266	46,56	F4	62,56	1,60	0,0269	42,96
E5	38,38	2,10	0,0267	56,13	F5	82,96	1,65	0,0265	43,79
E6	46,76	1,65	0,0272	44,82	F6	63,85	1,60	0,0266	42,61
průměr	43,67	1,73	0,0266	46,06	průměr	67,49	1,54	0,0267	41,29
sada vzorků: G ($\omega=95,43\%$)									
č.vz.	ω [%]	F_{max} [kN]	$l/b \cdot h^2$ [mm ²]	f_m [MPa]					
G1	85,87	1,70	0,0274	46,63					
G2	91,58	1,30	0,0267	34,71					
G3	86,54	1,50	0,0262	39,24					
G4	93,47	1,40	0,0267	37,32					
G5	133,46	1,55	0,0262	40,58					
G6	81,65	1,40	0,0271	37,91					
průměr	95,43	1,48	0,0267	39,40					

Příloha 5: Tabulka vypočítaných hodnot bobtnání pro jednotlivé vzorky

Bobtnání [%]				
sada vzorků B ($\omega = 10,09 \%$)				
číslo vz.	PODÉLNÉ	RADIÁLNÍ	TANGENCIÁLNÍ	OBJEMOVÉ
BI	0,48	5,40	4,12	10,27
BII	0,24	4,01	2,99	7,37
BIII	0,07	3,43	2,76	6,36
BIV	0,45	4,80	3,52	8,98
BV	0,17	4,35	3,89	8,59
BVI	0,21	5,70	3,75	9,89
průměr	0,27	4,62	3,51	8,58
B1	0,06	1,35	3,13	4,58
B2	0,10	1,74	2,80	4,70
B3	0,16	1,30	2,02	3,51
B4	0,19	1,29	2,47	4,00
B5	0,19	3,94	5,57	9,93
B6	0,15	1,69	2,00	3,87
průměr	0,14	1,89	3,00	5,10

Bobtnání [%]				
sada vzorků C ($\omega = 19,24 \%$)				
číslo vz.	PODÉLNÉ	RADIÁLNÍ	TANGENCIÁLNÍ	OBJEMOVÉ
CI	0,53	3,70	6,33	10,86
CII	0,53	5,70	5,92	12,55
CIII	0,46	7,33	4,80	13,00
CIV	0,51	7,07	5,36	13,38
CV	0,37	5,85	5,72	12,32
CVI	0,71	5,76	5,12	11,97
průměr	0,52	5,90	5,54	12,35
C1	0,10	3,66	6,11	10,10
C2	0,28	4,42	6,33	11,35
C3	0,34	2,68	5,60	8,79
C4	0,44	3,18	4,26	8,05
C5	0,28	3,86	5,63	10,01
C6	0,21	4,43	7,36	12,36
průměr	0,28	3,71	5,88	10,11

Příloha 5: Tabulka vypočítaných hodnot bobtnání pro jednotlivé vzorky

Bobtnání [%]				
sada vzorků D ($\omega = 27,95 \%$)				
číslo vz.	PODÉLNÉ	RADIÁLNÍ	TANGENCIÁLNÍ	OBJEMOVÉ
DI	0,34	5,01	4,97	10,61
DII	0,49	7,81	7,77	16,74
DIII	0,38	7,61	6,98	15,56
DIV	0,50	8,04	4,98	13,99
DV	0,67	6,95	6,72	14,90
DVI	0,37	6,02	6,29	13,11
průměr	0,46	6,91	6,29	14,15
D1	0,19	4,08	8,37	13,01
D2	0,20	4,46	9,24	14,35
D3	0,25	5,56	9,41	15,78
D4	0,18	7,45	9,62	18,00
D5	0,31	3,58	6,93	11,11
D6	0,21	3,74	7,93	12,20
průměr	0,22	4,81	8,58	14,08

Bobtnání [%]				
sada vzorků E ($\omega = 39,22 \%$)				
číslo vz.	PODÉLNÉ	RADIÁLNÍ	TANGENCIÁLNÍ	OBJEMOVÉ
EI	0,23	7,52	7,59	15,94
EII	0,47	7,31	8,60	17,09
EIII	0,66	8,37	8,97	18,87
EIV	0,21	8,74	6,34	15,88
EV	0,40	7,83	5,10	13,78
EVI	0,24	6,89	5,15	10,56
průměr	0,37	7,78	6,96	15,35
E1	0,17	6,19	10,34	17,37
E2	0,17	5,26	9,72	15,68
E3	0,24	5,73	10,20	16,79
E4	0,24	4,68	10,03	15,45
E5	0,22	4,05	8,71	13,35
E6	0,21	5,99	8,63	15,38
průměr	0,21	5,32	9,61	15,67

Příloha 5: Tabulka vypočítaných hodnot bobtnání pro jednotlivé vzorky

Bobtnání [%]				
sada vzorků F ($\omega = 58,14 \%$)				
číslo vz.	PODÉLNÉ	RADIÁLNÍ	TANGENCIÁLNÍ	OBJEMOVÉ
FI	0,19	8,27	8,13	17,29
FII	0,44	6,65	8,22	15,93
FIII	0,24	8,19	7,89	17,00
FIV	0,62	8,31	6,48	16,04
FV	0,43	7,07	7,45	15,53
FVI	0,08	6,59	6,46	13,56
průměr	0,33	7,51	7,44	15,89
F1	0,17	5,81	11,06	17,72
F2	0,36	3,53	7,50	11,70
F3	0,22	5,03	11,13	16,98
F4	0,22	5,38	9,93	14,99
F5	0,21	4,59	9,61	14,88
F6	0,21	6,37	10,11	17,37
průměr	0,23	5,12	9,89	15,61

Bobtnání [%]				
sada vzorků G ($\omega = 89,19 \%$)				
číslo vz.	PODÉLNÉ	RADIÁLNÍ	TANGENCIÁLNÍ	OBJEMOVÉ
GI	0,46	8,73	9,24	19,31
GII	0,12	7,14	8,26	16,13
GIII	0,21	10,37	7,37	18,75
GIV	0,38	7,74	7,80	16,59
GV	0,14	7,83	9,04	17,75
GVI	0,25	7,82	7,24	15,91
průměr	0,26	8,27	8,16	17,41
G1	0,20	5,47	9,87	16,12
G2	0,36	4,07	8,17	12,98
G3	0,33	3,84	8,05	12,57
G4	0,31	4,48	10,55	15,86
G5	0,27	5,82	10,21	16,94
G6	0,19	5,38	9,31	15,42
průměr	0,28	4,84	9,36	14,98

Příloha 6: Tabulka vypočítaných hodnot hustoty pro jednotlivé vzorky

Hustota [kg/m ³]					
sada vzorků A ($\omega = 0\%$)			sada vzorků B ($\omega = 10,09\%$)		
č.vz.	$\rho_{\text{suché}}$ [kg/m ³]	$\rho_{\text{vlhké}}$ [kg/m ³]	č.vz.	$\rho_{\text{suché}}$ [kg/m ³]	$\rho_{\text{vlhké}}$ [kg/m ³]
AI	518,06	-	BI	533,27	543,10
AII	540,79	-	BII	540,59	562,00
AIII	513,65	-	BIII	575,85	596,46
AIV	580,07	-	BIV	594,88	606,18
AV	391,91	-	BV	394,84	418,55
AVI	392,77	-	BVI	394,87	415,98
průměr	489,54	-	průměr	505,72	523,71
A1	579,65	-	B1	583,73	595,56
A2	539,79	-	B2	479,01	488,50
A3	486,83	-	B3	516,95	524,65
A4	503,74	-	B4	422,41	427,90
A5	429,32	-	B5	517,60	545,86
A6	509,28	-	B6	475,35	481,80
průměr	508,10	-	průměr	499,18	510,71

Hustota [kg/m ³]					
sada vzorků C ($\omega = 19,24\%$)			sada vzorků D ($\omega = 27,95\%$)		
č.vz.	$\rho_{\text{suché}}$ [kg/m ³]	$\rho_{\text{vlhké}}$ [kg/m ³]	č.vz.	$\rho_{\text{suché}}$ [kg/m ³]	$\rho_{\text{vlhké}}$ [kg/m ³]
CI	488,35	530,62	DI	517,12	627,15
CII	537,72	570,86	DII	549,00	601,59
CIII	591,17	620,27	DIII	588,22	649,24
CIV	590,29	617,29	DIV	588,64	649,59
CV	405,29	441,13	DV	407,58	462,42
CVI	387,83	421,46	DVI	405,26	449,83
průměr	500,11	533,61	průměr	509,30	573,30
C1	585,04	609,56	D1	566,83	627,98
C2	480,11	508,90	D2	469,14	544,26
C3	489,51	513,75	D3	520,99	570,46
C4	487,80	555,28	D4	513,51	553,49
C5	427,24	460,90	D5	514,65	582,51
C6	505,01	544,57	D6	429,94	490,13
průměr	495,79	532,16	průměr	502,51	561,47

Příloha 6: Tabulka vypočítaných hodnot hustoty pro jednotlivé vzorky

Hustota [kg/m ³]					
sada vzorků E ($\omega = 39,22\%$)			sada vzorků F ($\omega = 58,14\%$)		
č.vz.	$\rho_{\text{suché}}$ [kg/m ³]	$\rho_{\text{vlhké}}$ [kg/m ³]	č.vz.	$\rho_{\text{suché}}$ [kg/m ³]	$\rho_{\text{vlhké}}$ [kg/m ³]
EI	528,31	603,28	FI	534,63	677,26
EII	520,32	592,79	FII	513,93	642,92
EIII	595,81	670,80	FIII	588,09	742,10
EIV	578,74	668,52	FIV	583,57	721,96
EV	394,79	515,37	FV	395,00	560,78
EVI	397,65	455,10	FVI	401,66	508,86
průměr	502,60	584,31	průměr	502,81	642,31
E1	578,39	676,95	F1	575,52	816,72
E2	474,04	614,20	F2	489,04	704,08
E3	522,05	678,57	F3	531,53	761,92
E4	508,52	607,15	F4	496,56	701,97
E5	503,42	614,57	F5	511,60	814,79
E6	505,84	643,39	F6	514,12	717,69
průměr	515,38	639,14	průměr	519,73	752,86

Hustota [kg/m ³]					
sada vzorků G ($\omega = 89,19\%$)					
č.vz.	$\rho_{\text{suché}}$ [kg/m ³]	$\rho_{\text{vlhké}}$ [kg/m ³]			
GI	537,90	799,03			
GII	513,14	749,65			
GIII	596,40	858,38			
GIV	400,06	673,84			
GV	406,12	713,96			
GVI	409,18	623,15			
průměr	477,13	736,34			
G1	552,51	884,41			
G2	494,11	837,85			
G3	509,83	844,85			
G4	503,66	841,02			
G5	521,18	1039,19			
G6	500,31	787,43			
průměr	513,60	872,46			